

碩士學位論文

노상 흙쌓기 다짐밀도측정에
관한 연구



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

金 申 男

2 0 0 4

노상 흙쌓기 다짐밀도측정에 관한 연구

指導教授 南 正 萬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2004年 6月

 濟州大學校 産業大學院
建設環境工學科 土木工學 專攻

金申男의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2004年 6月

委 員 長	印
委 員	印
委 員	印

Research on Measuring the Stacking
Compaction Density of Road Soil

Sin-Nam Kim

(Supervised by Professor Jung-Man Nam)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Master of Engineering

2004. 6.

This thesis has been examined and approved.

Department of Construction and Environmental Engineering
Graduate School of Industry
Cheju National University

목 차

목 차	i
Table Contents	iii
Figure Contents	iv
Summary	vi
I. 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	2
II. 기존 이론	3
2.1 흡의 특성	3
2.2 흡의 생성	9
2.3 다짐이론	12
2.4 기존 다짐밀도 측정시험법	27
III. 다짐밀도 측정시험법	60
3.1 실내다짐시험	60
3.2 모래치환법에 의한 현장 들밀도시험	62
3.3 평판재하시험	67
3.4 합성재료에 대한 들밀도 시험방법의 제안	70

IV. 시험결과	73
4.1 체가름 시험결과	73
4.2 실내 다짐시험결과	76
4.3 모래치환법에 의한 들밀도 시험결과	78
4.4 평판재하시험결과	79
4.5 합성재료에 대한 들밀도 시험결과	83
V. 결론	85
VII. 참고문헌	88



Table Contents

Table 2.1	Effect of Transportation on Sediments	11
Table 2.2	Comparison Dry of Optimum with Wet of Optimum Compaction	26
Table 2.3	Types of Compaction Tests	28
Table 2.4	Properties of Compaction According to Unified Soil Classification System	34
Table 2.5	Compaction Equipments	36
Table 2.6	Compaction Management Index	47
Table 2.7	Compaction Management Method of Ministry of Construction & Transportation	48
Table 2.8	Compaction Management Method In Japan	49
Table 3.1	Compaction Energy According to Laboratory Compaction Tests	62
Table 3.2	Minimum Volume of Testing Holes and Weight of Sample	63
Table 4.1	Compaction Criterion	75
Table 4.2	Result of Laboratory Compaction Test	78
Table 4.3	Results of Sand Cone Method	79
Table 4.4	Conversion Table of Bearing Capacity Facto	83
Table 4.5	Values of K_{75} According to Road Soil	83
Table 4.6	Results of Measuring Compaction Density of Synthesized Materials	84

Figure Contents

Fig. 2.1	Stress-Strain Relationship	8
Fig. 2.2	Field Compaction Process	13
Fig. 2.3	Standard Proctor Compaction Test	15
Fig. 2.4	Dynamic Compaction Curves	16
Fig. 2.5	Static Compaction Curves for a Silty Clay	17
Fig. 2.6	Typical Compaction Curve for Cohesionless Sands and Sandy Gravels	18
Fig. 2.7	Effects of Compaction on Structure	19
Fig. 2.8	Stress Paths for Oedometer Test	20
Fig. 2.9	Pore Pressures in Compacted Kaolinite	22
Fig. 2.10	Compaction-Permeability Tests on Siburua	23
Fig. 2.11	Effect of One-Dimensional Compression on Structure	24
Fig. 2.12	Influence of Molding Water Content on Structure and Stress-Strain Relationship for Compacted Samples of Kaolinite	25
Fig. 2.13	Setup for Standard Compaction Test	28
Fig. 2.14	Compaction Curve	29
Fig. 2.15	Influence According to Compaction Energy and Zero-air-void Curve	31
Fig. 2.16	Four Steps of Compaction Curve	32
Fig. 2.17	Influence of the Field Compaction for a Lean Clay	37
Fig. 2.18	Dry Unit Weight Variation with Depth	38
Fig. 2.19	Dry Unit Weight Variation with Depth According to Passing Number of Time	

of the Vibratory Roller	39
Fig. 2.20 Effects of Compaction According to Compaction Equipments	40
Fig. 2.21 Effects of Field and Laboratory Compaction for a Sand	40
Fig. 2.22 Effect of Compaction with Depth	42
Fig. 2.23 Compaction Curves According to Compaction Equipments ..	43
Fig. 2.24 Drying of Rod Soil	45
Fig. 2.25 Quality Control of Compaction	45
Fig. 2.26 Stress-Strain Relationship According to Dynamic and Static Compaction	50
Fig. 2.27 Properties of the Compacted Soil	52
Fig. 2.28 Excavation in Sand Cone Method	53
Fig. 2.29 Rubber Balloon Method	54
Fig. 2.30 Plate Bearing Test	55
Fig. 2.31 Load-Settlement Curves for Plate Bearing Test	57
Fig. 3.1 Setup for Sand Cone Method	63
Fig. 3.2 Plate Bearing Test(Loading)	69
Fig. 3.3 Plate Bearing Test(Measuring Load and Settlement)	69
Fig. 3.4 Measuring Compaction Density of Synthesized Materials	72
Fig. 4.1 Results of Sieve Analysis	74
Fig. 4.2 Compaction Curve for the Site A	77
Fig. 4.3 Compaction Curve for the Site B	77
Fig. 4.4 Relationship between K_{75} and CBR	81
Fig. 4.5 Result of Plate bearing Test at the Site A	82
Fig. 4.6 Result of Plate bearing Test at the Site B	82

Summary

Since the Soil Test of JIS (engineering standards) was enacted in the 1950s, the Soil Engineering Technology Research Center published the book, *Soil Engineering*, first in 1969 and the revised version in 1979. Thanks to the initial research results, we were able to apprehend the development of technologies, and discover the regulations on the previous test methods or the inappropriate matters. Given the advancement in the working environment or test tools, the indoor test results aimed at applicability of the sand density test and plate bearing test in the past. Considering our research as a process to approach truth about properties of various soil substances, we applied the test methods suitable for the local and working conditions, and intended to advance the soil test methods. The usual test method involves homogeneity of materials, but the back-fill materials arising from the workplace are synthesized materials of the unscreened soil where the compaction test method is not provided. Ordinarily, the sand density test is applied to test the compaction of soil and the selection of a sand substitute, which is inappropriate for the Je-ju Island whose soil contains a lot of rocks. Thus, the plate bearing test specifies compaction in the Je-ju Island, and the rocks 100mm or less should be used as the road soil material under the current regulations. Nevertheless, considering the actual economic value, most soils are used without screening, and our plate bearing test proved that it was impossible to obtain the accurate compaction density due to

non-homogeneity of materials. Consequently, in order to establish an accurate test method, we improved the work-site sand density test, and designed the sand density test method by enlarging the test area (2m*2m) and using water, not the sand substitution method. Since various rules and current regulations with respect to management of materials are not reflected on the designs at the rack-fill construction site, our design is playing an important role in administering constructions. As the neglectful compaction management leads to residue subsidence and road damages, which results in subsequent deterioration in driving and over-ray execution, significant economic losses may arise, for which we believe that the back-fill material management must be conducted thoroughly.



I. 서론

1.1 연구배경

현재 우리나라에서 이용되고 있는 토질시험법은 1950년 대 JIS(일본공업규격)의 토질시험이 재정된 이래 1969년에 최초로 개정된 이후 수차례 개정된 KS F규정을 따르고 있다. 그러나 토목기술의 발전과 대규모의 토목 구조물 공사가 이루어지고 있는 현재의 건설 환경에서 종전의 시험법을 적용하기에는 불합리한 사항을 발견할 수 있다. 그러므로 현장여건이나 시험기구의 발전 등으로 실내 시험결과가 과거의 시험방법과 현저한 차이가 발생하는 점을 고려하여 흙이라는 다양한 물질의 성질에 대한 보다 합리적인 공학적 판단을 위한 기존 시험방법에 대한 고찰과 좀 더 진보된 시험법을 제시할 필요가 있다. 통산적인 시험법은 재료의 균질성에 의해 시험토록 되어 있으나 현장에서 발생하는 흙의 합성재료에 대한 다짐도 시험법이 규정되지 않아 평판재하시험의 침하량으로 다짐밀도를 규정하고 있으며 정확한 다짐 밀도를 규정하고자 보다 정확한 현장 들밀도 시험을 착안하게 되었으며, 현장에서 흙쌓기 시공 중 제반 준수사항이 설계에 반영되지 않아 시공관리 차원에서 매우 중요한 부분을 차지하고 있어 검토해야 할 사안이라고 생각한다.

1.2 연구목적

최근 국내 건설사업의 추진과정에서 발생하는 흙의 처리는 환경보전 및 건설사업의 비용증감 등에 커다란 사회문제로 대두되고 있다. 흙쌓기 요구 재료로써 다소 불충분하여도 현장에서 적절한 방법으로 흙을 유효하게 사용되고 있는데 충분한 강도나 입도가 시방규정에 충족하지 않아도 유토곡선에 의해 상용되는 것이 현실이다. 이에 따라 포장 종료 후에 잔류 침하가 계속 진행되어 노면의 평탄성을 해쳐서 도로의 주행성을 저감시키고 차량의 대형화 및 교통량 증가로 교통난이 심화되어 포장체에 악영향으로 포장의 유지보수가 요구되어 교통의 흐름을 저하시킬 수 있으며 경제적 손실을 초래하고 있다. 따라서 다짐시험 방법의 적용성 및 흙의 합성 재료 사용 시 다짐도 시험방법을 규정하고 현실화시켜 흙 쌓기 시공 시, 잔류침하량의 예측을 통한 쾌적한 주행성을 향상시키기 위하여 보다 정확한 방법의 현장 들밀도 시험을 착안하여 현장 실측결과와 실내시험결과를 비교 분석한 결과에 따라 적합성 및 그에 따른 대책을 강구함으로써 차후 설계 시공에 반영될 수 있는 자료가 되도록 하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 본 연구에서는 흙의 합성재료의 다짐밀도를 규정하기 위한 평판재하시험과 들밀도 시험의 차이점을 비교 분석하고자 한다.

Ⅱ. 기존 이론

2.1 흙의 특성

흙을 이용하여 구조물을 축조하고자 하는 경우 예를 들어 공항, 댐, 도로, 하천제방 등과 같이 목적물의 기능과 안정성을 확보하기 위해서 흙을 다지게 된다. 현장에서 이용되는 흙의 기능성과 안정성을 확보하기 위해서는 흙의 물리적, 공학적 특성을 파악하여 사용가능 여부를 판단한 후 이용하여야 한다. 따라서 현장에서는 시공 전 토질시험을 통해 시방기준에 맞는 토취장을 선정하고 선택된 그 재료의 특성과 작업 효율을 감안하여 적절한 다짐 장비를 현장에 투입시키고 흙의 함수량을 조절하여 시공하여야 한다.

흙을 다지는 목적은 지지력 증대, 축조된 흙 구조물 변위량의 최소화, 불투수성의 확보로 나눌 수 있다. 다지는 목적은 앞에서 제시한 세 가지 특성을 동시에 충족해야 되는 경우도 있고 한 가지 또는 두 가지 특성만을 요구하는 경우도 있어 각 구조물 특성에 맞도록 효율적인 다짐 상태 관리를 유지해야 한다.

적절한 다짐 상태의 확보는 토질의 특성, 기초지반 조건, 다짐장비, 다짐시의 흙의 함수량, 주어진 환경, 시공방법(층 두께와 다짐도의 규정)등에 따라 다르기 때문에 이들의 조건 및 상태를 알아야 한다. 따라서 흙의 특성을 살펴보고자 한다.

1) 공학적 의미로서의 흙

일반적으로 “흙”이라는 단어를 식물생명의 유지가 가능하도록 덮여 있는 비교적 얇은 지표면을 의미하는 것으로 생각한다. 그러나 토목기술자들은 이를 표토라고 정의하며, 대부분의 건설현장에서 토목공사가 시작되기 전에 표토를 제거하게 된다. 따라서 흙의 공학적 의미를 정의하여 할 필요가 있다.

Terzaghi와 Peck가 정의한 공학적 흙에 대한 정의를 살펴보면 다음과 같다.

흙은 광물입자의 자연적인 집합체이며, 물의 휘저음과 같은 부드러운 역학적 수단에 의해서 분리될 수 있다. 반면에 암석은 영구적으로 강한 결합력으로 연결된 광물의 자연적인 집합체이다. ‘강함’ 과 ‘영구적’ 이라는 단어는 다르게 해석되기 때문에 흙과 암석사이의 경계는 필연적으로 임의적인 경계이다.

또한 R. F. Scott에 의하면 다음과 같다.

가장 일반적인 의미로서의 흙은 광물입자와 유기질 입자로 구성되어 있으며 상호입자가 분리되어 있거나 고결되지 않은 입상재료를 말한다.

공학자들이 흙으로 분류한 많은 재료들은 입자들 간의 결합이 약하게 존재할 수 있고, 따라서 입상체의 역학적 특성을 보여주고 있다. 그러나 만일 어떠한 물질이 흙으로 분류되었다면 이러한 결합이 입상재료를 단단한 암석과 같은 형태로 가정하는 원인이 되어서는 안 된다고 정의하고 있다(J.H Atkinson & P.L. Bransby, 2001).

이러한 정의는 흙의 고체부분의 구성만을 다루는 한 매우 만족스러운 것이며, 광물입자들 사이의 공극은 물로 채워져 있다고 간주해야 한다. 간극수압이란 간극수 안에 있는 압력이고 흙의 역학적 거동에 매우 중요한 영향을 끼친다.

2) 건설재료로서의 흙

흙은 지구상에서 가장 풍부한 건설재료로서, 어느 지역에서든지 쉽게 이용할 수 있는 유일한 건설재료이다. 따라서 토목기술자가 흙을 건설재료로 사용할 때에는 적절한 흙의 종류와 포설방법을 선택하여 건설작업을 관리해야 한다. 인위적으로 포설된 흙을 흙쌓기 또는 성토라고 하며 포설하는 과정을 흙쌓기 작업 또는 성토작업이라 한다. 흙을 건설재료로 사용할 때 가장 일반적인 문제는 흙의 종류의 다양성을 들 수 있다. 따라서 토목기술자는 포설되는 흙의 특성이 설계에서 채택한 값과 같은지를 확인하거나, 시공하는 동안 성토재의 특성과 설계에서 사용한 특성간의 차이가 있는 경우 이를 보완하여야 한다.

본 연구에서는 흙을 이용하여 시공되는 수많은 구조물 중에, 연구주제와 관련 있는 도로현장에서 이용되는 건설재료로서의 흙에 대하여 간략하게 살펴보고자 한다.

흙은 건설재료로서 가장 일반적이고도 폭넓게 사용하는 경우 중의 하나가 도로와 공항의 포장이다. 포장은 휨성일 수도 있고, 강성일 수도 있다. 휨성포장은 바퀴의 집중하중을 기초로 분산시켜 응력집중을 방지하는 것이 주된 기능이다. 철근콘크리트와 같은 강성 포장도 기초지반의 연약부분들과 일체로 연속 거동할 수 있을 정도로 충분한 휨강도를 갖는 것으로 알려져 왔다. 어떤 포장이 더 나은가 하는 것은 기초의 성격, 건설재료의 이용가능성, 포장의 이용목적 등에 따라 다르다(Lambe & Whitman, 1999).

3) 비연속체로서의 흙

흙이라는 재료가 강철이나 콘크리트와 근본적으로 구별되는 것은 흙이라는 재료가 비연속체 (Discrete material)이라는 사실이다. 즉, 흙 입자 그 자체는 각각의 입자 하나가 고체이지만 고열이나 큰 압력에 의한 물리적 결합이 이루어진 것이지, 화학반응에 의한 화학적 결합이 아니기 때문에 각각의 입자가 강하게 부착되어 있지 않다. 따라서 흙 입자는 외력에 의해 쉽게 분리될 수 있으므로 입자 상호간에 위치변화가 쉽게 일어난다.

이러한 관점에서 본다면 흙은 암반과 구별된다. 광물입자들이 쉽게 분리될 수 있는 반면, 암반은 영속적인 결합력에 의하여 강하게 부착되어 있다.

비연속체 재료인 흙에 대한 토질역학이 고체역학이나 유체역학과 근본적으로 차이를 보이는 것은 흙 입자 사이에는 압축성이 큰 공기와 비압축성의 물이 존재하고 있기 때문이며 흙에 하중이 가해지는 경우 이러한 물질의 상호작용 때문에 하나의 균질한 물질로 되어 있는 경우와는 달리, 힘의 전달이나 변위가 단순하지 않은 특성이 있다.

4) 흙의 거동

대단히 미세한 흙의 경우는 입자 상호간에 전기력이 작용하기도 한다. 흙의 이와 같은 복잡한 거동을 과학적으로 규명하기 위해 다음과 같은 흙의 거동특성을 살펴볼 필요가 있다.

흙은 완전 탄성거동을 보이지 않기 때문에 압축시험을 실시하면 흙의 종류에 따라 응력-변형곡선이 달라진다.

그림 2.1의 곡선 (1)은 단단한 흙으로서 그 곡선이 작은 변형률에서는 탄성체에 가깝게 직선이 되고 최대강도에 이르러 갑작스럽게 파괴되어 버린다. 이 곡선은 강도의 크기가 분명하고 직선에 가깝지만 실제로 완전

탄성체와 같은 탄성적인 거동은 하지 않는다.

곡선(2)는 연약한 흙의 거동을 나타낸 것이다. 변형이 상당히 크게 일어나도 강도는 거의 일정한 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 이러한 지반에 놓이는 구조물의 안전성은 강도는 물론 변형이 중요한 요소가 되어 구조물의 파괴 외에도 기능상의 문제가 추가적으로 검토되어야 한다.

그림 2.1의 곡선(1)과 (2)의 사이에는 무한히 많은 토질이 존재할 수 있다. 이 곡선들의 처음 부분 즉 낮은 응력에서는 거의 직선에 가까우므로 변형계수를 구하여 흙의 탄성적인 거동을 추정하는데 이용되고 있다.

흙의 거동은 응력에 의존할 뿐만 아니라 시간과 환경에도 의존한다. 흙은 다른 재료와 마찬가지로 응력의 크기에 따라 변형이 일어나고 어느 한계에 이르면 파괴되는데 이는 시간과 환경에 따라서 흙의 거동이 크게 달라질 수 있다. 풍화된 연약한 지반에 하중이 가해지면 이 지반은 시간의 경과에 따라 침하가 발생되며 이를 압밀이라고 한다. 또한 흙은 온도가 빙점이하로 하강하면 흙 속에 있는 물이 얼고 그 흙은 체적이 팽창한다. 흙이 동결하면 높은 전단강도를 보이지만 융해 시 함수비가 많아지면서 연약해 지므로 이러한 지반에서 구조물 시공 시 유의해야한다.

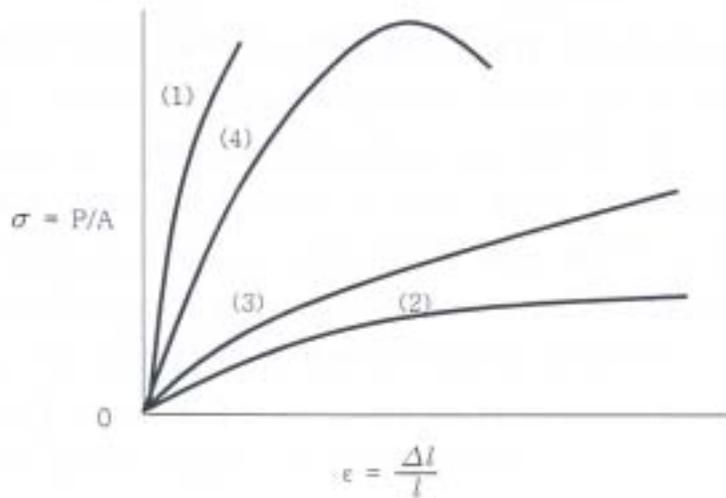


Fig. 2.1 Stress-Strain Relationship



5) 흙의 비등방 비균질성

흙의 성질은 본질적으로 비균질하고 또한 비등방성(比等方性)이다.

자연지반은 위치마다 풍화이력과 퇴적이력에 따라 공학적 성질이 다르며 동일한 위치에서도 연직방향과 수평방향의 성질이 달라 비등방 비균질하다고 말할 수 있다.

지반 내 흙의 한 요소는 역학적으로 연직방향과 수평방향의 토압이 각각 다르므로 지반은 깊이에 따른 전단강도의 변화를 고려해야 한다.

2.2 흙의 생성

기계적 또는 화학적 작용물, 침식, 이동, 퇴적, 그리고 이후 퇴적물에 의한 압축 등 지각풍화의 자연적인 순환은 수년에 걸쳐 지질학자에 의해서 평가되어 왔다. 맨틀에 대한 지각재료의 손실과 지각에 대한 신선한 맨틀재료의 공급에 의한 순환의 잔류물은 최근에 와서 대륙이동설과 판구조론에 의하여 설명되어진다. 풍화, 퇴적, 그리고 어느 정도의 압축을 포함한 지질학적 순환중의 일부가 공학적인 흙을 형성한다.

퇴적으로 인하여 큰 압축을 받는 깊은 심도의 흙은 공학적 의미에서 암석으로 변할 수 있으며 반면에 지표면 가까이 존재하는 암석은 풍화작용에 의하여 흙으로 변할 수 있다.

흙은 암반이 물리적인 풍화작용(Physical Weathering), 화학적인 풍화작용 (Chemical Weathering) 또는 용해작용(Solution)에 의해 미세한 조각으로 분해 되어 이루어진 것이다.

물리적 풍화작용은 암석이 작은 조각으로 파쇄 되거나 마모되어 가는 과정을 말한다. 이것은 균열 속에 있는 물이 얼어 팽창하거나 심한 온도 변화로 암반이 팽창 또는 수축하거나, 유수에 의하여 운반되는 모래와 자갈이 마모되기 때문에 일어난다.

화학적 풍화작용은 화학반응에 의하여 모암과는 전혀 다른 광물이 생성되어 암석 광물의 성질이 화학적으로 바뀌는 것을 말한다.

용해작용은 암반으로부터 가용성 광물은 녹이고 비가용성(非可溶性) 광물은 잔류물로 남겨두는 과정을 말한다.

이러한 세 가지 작용은 각각 다른 속도로 동시에 일어나지만 기후, 지형, 모암의 성분 등에 따라 풍화정도를 달리한다. 일반적으로 따뜻하고

습기가 많은 평탄한 지방에서는 화학적 풍화작용이 활발하고 지형이 험하고 기후가 건조한 지방에서는 물리적 풍화작용이 활발하다. 용해작용은 일반적으로 습도가 높은 지방에서 많이 일어난다.

상기에서 기술한 바와 같이 세 가지 작용에 의하여 이루어진 흙은 그 자리에 남아 있기도 하고 물이나 바람 또는 빙하의 이동으로 멀리까지 운반되어 퇴적되기도 한다. 전자로 잔적토(Residual Soil)라 하고 후자를 퇴적토(Transported Soil)라 한다. 흙의 이동여부에 따라 구분되는 잔적토와 퇴적토는 역학적인 큰 차이를 나타낸다.

1) 퇴적토

퇴적토의 형성은 앞서 기술한 바와 같이 지구표면에 존재하는 암반이 물리적 화학적 풍화작용에 의하여 형성된다. 일반적으로 실트, 모래, 자갈 크기의 입자는 암반의 물리적 풍화작용에 의하여 생성되며, 점토크기의 입자는 암반의 화학적 풍화작용에 의하여 형성된다. 암반으로부터의 점토입자의 생성은 용액 속에서 광물입자가 점적(Build-up)되거나 다른 광물의 화학적 분해에 의하여 일어날 수 있다. 이러한 과정으로 형성된 퇴적물은 물, 공기, 얼음, 중력, 생물체에 의하여 이동되는데 이동 과정에서, 퇴적물에 두 가지의 영향을 미친다. 마모 갈림(Grinding), 충격, 용해 등의 작용으로 입자의 형성, 크기, 결(Texture)을 변화시키며 이동과정에서 입자의 크기별로 분류시킨다. 표 2.1은 Soil Mechanics-SI version에서 발췌한 이동과정에서 운반인자가 퇴적입자에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

토립자는 생성된 후 퇴적되어 퇴적토를 형성하게 된다. 물에서 퇴적되는 3가지 주요인은 속도감소, 용해도의 감소, 전해질의 증가가 있다. 물은 토립자의 침강속도를 감소시켜 퇴적현상이 일어나며, 수온이나 화학적

성질의 변화는 용해도를 감소시켜 용해되어 있는 물질은 침전시킨다.

Table 2.1 Effect of Transportation on Sediments

	물	공기	얼음	중력	생물
크기	약간 감소시킴	크게 감소시킴	크게 감소시킴	크게 감소시킴	약간감소시킴
형상	모래와 자갈을 둥글게 함	크고 둥글게 함	각지게 함	각지게 함	
표면의 결	모래 : 매끈하게 함 실트 : 영향을 안미침	거칠게 함	거칠게 함	거칠게 함	
분류능력	상당히 분류시킴	매우 상당히 분류시킴(점진성)	극히 작은 분류	분류 없음	제한된 규모의 분류

2) 잔적토



잔적토는 암반이 풍화된 후 운반되지 않고 제 위치에 쌓여서 형성된 흙이다. 암반이 분해되어 흙이 되는 속도가 분해된 흙이 제거되는 속도보다 빠르면 잔적토가 생성되는 것이다. 풍화되어 생성된 흙의 성질과 풍화속도에 영향을 미치는 요소로는 기후, 온도, 강우량, 시간, 모암의 형태, 식생, 배수, 박테리아의 활동 등이 있다. 잔적토층은 3개의 층으로 구분되는데 풍화의 정도가 심하고 생성된 흙이 쉽게 다른 곳으로 이동될 수 있는 상부층(Upper zone)과 상단에서 어느 정도의 풍화가 진행되며 하단 쪽으로 풍화된 물질을 쌓이게 하는 중간층(Intermediate zone), 그리고 풍화된 물질에서 풍화되지 않은 모암까지의 천이지역인 부분 풍화층(Partially weathered zone)으로 구성되어 있다.

2.3 다짐이론

현장에서 어떠한 구조물을 시공하는 경우, 어떠한 부지의 흠도 이상적인 조건을 갖추고 있다고 볼 수 없다. 그러므로 경우에 따라 부지위치를 바꾸거나, 흠을 제거하거나 또는 치환함으로써 문제를 해결하기도 하였다. 그러나 차량속도가 고속화 되면서 직선에 가까운 선형(Alignment)을 유지할 필요가 있었고 도시의 성장 및 산업부지의 확대에 양호한 조건의 부지를 선정하기가 갈수록 어려워지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안 중 하나가 지반을 개량하는 것이다. 이를 지반 안정화(Soil stabilization)라고도 하며 광의의 의미로 지반의 공학적 성질을 개선하는 것이다. 일반적으로 강도를 증대시키거나 압축성 또는 투수성을 저하시킴으로서 지반개량의 목적을 이루고자 한다. 이를 위해 현재까지 많은 공법이 개발 발전되었다. 수많은 공법 중 현재까지 가장 빈번히 이용되고 있으며 본 연구의 주제와 부합하는 다짐공법에 대하여 살펴보려고 한다.

1) 현장다짐

다짐의 목적은 다짐을 통한 밀도의 증대(Densification)를 지반개량이라 볼 수 있다. 다짐장비를 이용하여 기존의 원지반의 밀도를 증대시킬 수 있다. 원지반의 다짐은 대체로 지표면으로부터 0.3m 범위를 다지거나 채움재의 포설 또는 모래다짐 전의 노반(Subgrade)다짐에 국한된다. 모래는 때때로 1~2m 깊이까지 롤러를 이용하여 다질 수 있으나 대부분의 다짐은 신규로 흠을 포설하는 공사에서 이용된다.

현장에서의 다짐과정은 다음과 같은 단계로 이루어진다.

Fig. 2.2 Field Compaction Process



다짐시공 시 이용되는 기본적인 롤러의 형태는 평탄롤러(Smooth-weel roller), 고무타이어롤러, 양족롤러(Sheeps-foot roller), 진동롤러 등이 있다. 다짐시공이 이루어지는 대상지반이 점성토인 경우 어떠한 롤러장비를 이용하여도 높은 다짐밀도를 얻을 수 있으나, 일반적으로 높은 타이어 압을 갖는 고무타이어롤러가 가장 효율이 높으며 진동롤러가 효율이 가장 낮다. 사질토의 경우 진동롤러와 고무타이어롤러 모두 효율이 양호한 편이어서 높은 밀도증진 효과를 기대할 수 있다. 요구되는 지반개량효과를

언거나 균등한 지반조성을 형성하기 위해서는 추가적으로 합리적인 현장 다짐관리가 이루어져야 한다.

2) 다짐시험

토질 기술자는 최소비용으로 소요지반특성을 얻을 수 있도록 최적다짐 조건을 선정하여야 한다. 이를 위하여 우선 흙의 거동과 포설상세에 관한 관계를 아는 것이 필요하다. 이러한 정보는 다짐원리, 현장시험 및 실내시험으로부터 얻을 수 있다.

실내시험은 원래 현장다짐시험보다 경제적 측면에서 비용이 덜 들며 시험이 신속하게 이루어진다는 장점이 있다. 현재 많은 종류의 실내시험이 있으며 현장 다짐목적에 적합한 시험방법을 선택하여 이용하고 있다.

다짐은 그 방법에 따라 세 가지 방법으로 분류할 수 있다. 먼저 다짐 시험용 몰드에 시료를 채우고 제한된 횟수와 높이로 해머타격을 가하는 형태의 시험방법인 동적 다짐(Dynamic compaction)과 시료로 채워진 몰드에 규정된 응력으로 규정된 횟수만큼 탬퍼(tamper)로 눌러 다짐하는 반죽다짐(Kneading compaction)이 있다. 마지막으로 정적 다짐(Static compaction)은 규정된 크기의 정적 응력으로 다짐을 실시하는 것이다.

그림 2.3은 각기 다른 함수비를 갖는 동일한 점성토에 대하여 Proctor가 제안한 다짐시험을 Lambe가 1951년에 실시하여 얻어진 다짐곡선을 도시하였다. 이 다짐곡선으로부터 함수비가 증가함에 따라 건조밀도가 최대치까지 증가하다가 감소하는 경향을 알 수 있다. 최대밀도에서의 밀도와 함수비를 각각 최대건조밀도 및 최적함수비(Optimum moisture content)라고 하며, 최적함수비의 값은 이용한 다짐방법 및 다짐에너지에 따라 달라진다.

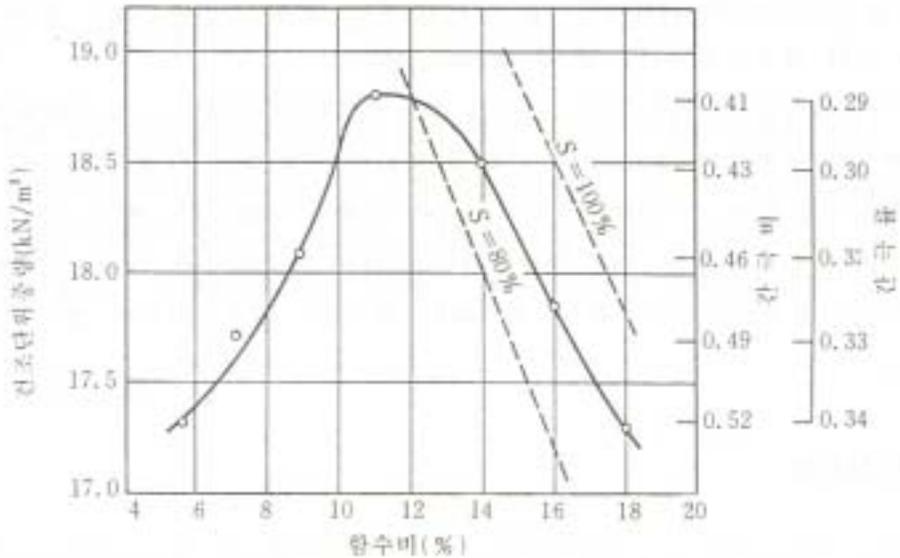
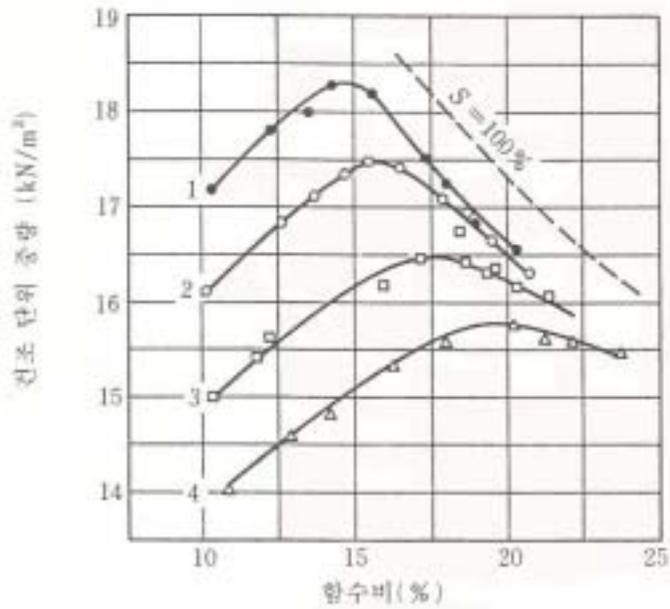


Fig. 2.3 Standard Proctor Compaction Test



일정한 포화도에서 함수비와 건조밀도의 관계를 다짐곡선과 같은 스케일로 표시할 수 있다. 그림 2.3에서 볼 수 있는 바와 같이 포화도는 함수비 증가에 따라 증가한다. 이러한 경향은 최적함수비를 약간 넘을 때까지 계속되다가 그 이후에는 거의 일정한 값으로 유지된다.

특정한 흙에 대한 함수비-밀도 관계는 그림 2.4 및 2.5에서 보인바와 같이 다짐에너지 및 다짐형태에 따라 달라진다. 그림 2.4는 Turnbull이 1950년에 동적다짐방법을 이용한 4가지 실내시험 결과를 나타낸 것이다. 시험 1에서 4까지 다짐에너지가 감소하는 경향을 보인다. 다짐방법이 같을 경우 다짐에너지가 클수록 최대밀도는 커지고 최적함수비는 낮아진다. 또한 함수비가 증가할수록 다짐에너지가 밀도에 미치는 영향은 감소한다. 최대건조밀도와 최적함수비가 나타내는 점을 다짐에너지에 따라 도시하면 포화도 일정곡선과 평행한 형태의 직선으로 나타난다.



번호	층수	층당 타격횟수	해머 중량	해머 낙고	비고
1	5	55	4.54kg	457mm	수정 AASHO
2	5	26	4.54	457	
3	5	12	4.54	457	표준 AASHO
4	5	25	2.50	305	
시험에 사용된 몰드의 직경은 150mm					

Fig. 2.4 Dynamic Compaction Curves

그림 2.5는 동일한 흙에 대하여 현장 및 실내 다짐시험 결과를 비교한 것이다. 이 그림은 현장다짐과정을 실내에서 재현하는 데 따른 어려움을 예시한 것이다. 일반적으로 실내시험의 최적함수비가 실제현장지반의 최적함수비보다 약간 작다. 실내다짐시험과정을 변화시키면 함수비-밀도 관계를 특정 현장다짐결과와 더 잘 일치시킬 수 있는 경우가 있다. 실내 반축다짐시험과 현장양축롤러다짐관계와 같이 현장 다짐에 더 잘 일치하는 실내다짐형태가 있다고 알려져 있다(Lambe & Whitman,1999).

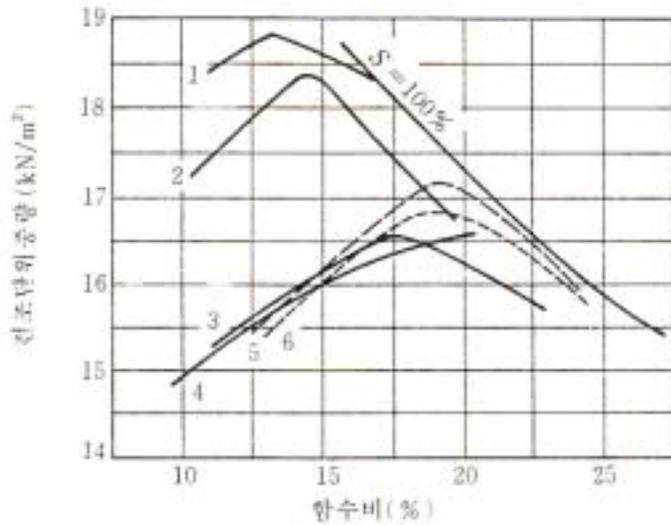


Fig. 2.5 Static Compaction Curves for a Silty Clay

- (1) 실내다짐 (2) 수정 AASHO (3) 표준 AASHO
- (4) 실내정적다짐 (5) 현장다짐 고무 타이어나중 6회
- (6) 현장다짐 양측롤러 6회

일반적으로 알려진 바와 같이 사질토를 다지는 데는 진동다짐이 효과적이다. 그러나 사질토는 다짐함수비 및 다짐에너지 변화에 대하여 다짐특성이 세립질의 점성토와는 다른 양상을 보인다. 그림 2.6은 Foster가 1962년에 모래와 모래질 자갈에 대하여 다짐시험을 실시한 결과를 나타낸 것으로 사질토 다짐곡선의 전형적인 예를 보인 것이다. 낮은 함수비에서 낮은 밀도가 얻어지는 이유는 모관력이 모래입자의 재배치를 방해하기 때문이다. 이러한 현상을 ‘벌킹(bulking)’이라 한다. 다짐 모래의 밀도는 자연사질지반과 마찬가지로 상대밀도로 측정하는 것이 일반적이다.

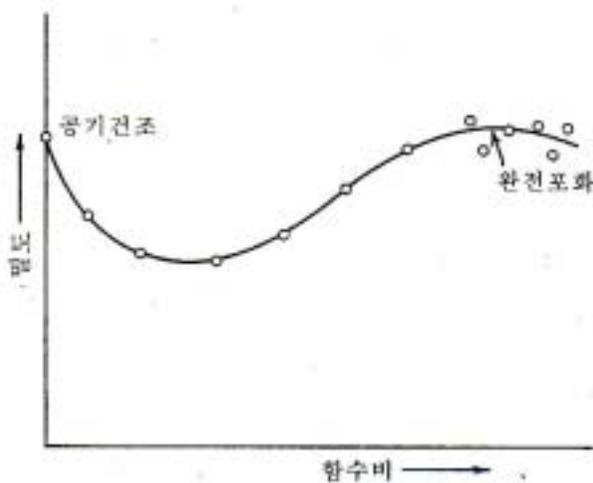


Fig. 2.6 Typical Compaction Curve for Cohesionless Sands and Sandy Gravels

3) 흙 구조에 대한 다짐의 영향

그림 2.7은 Lambe가 1962년에 제시한 다짐이 흙의 구조에 미치는 영향을 보인 것이다. 같은 다짐에너지 및 건조밀도에 대하여 습윤 측보다 건조 측이 면모 구조화하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 C점보다 A점이 보다 면모구조이다. 일정한 함수비에서 단지 다짐에너지만을 증가시키면 분산 구조가 되는데 이러한 특성은 최적함수비의 습윤 측(C점과 D점 비교)에서도 어느 정도 발견되나 건조 측에서(A점과 E점) 현저하게 나타난다.

그림 2.7에서 나타난 흙의 구조는 함수비 및 다짐에너지에 따라 재배열된다. 즉, 함수비의 증가는 입자간 척력(斥力)을 증가시켜 같은 다짐에너지일지라도 입자를 나란히 배열시키는 경향이 있으며, 일정한 다짐함수비에서 다짐에너지를 증가시키면 입자는 보다 더 평행한 구조를 이루게 되는 경향이 있다.

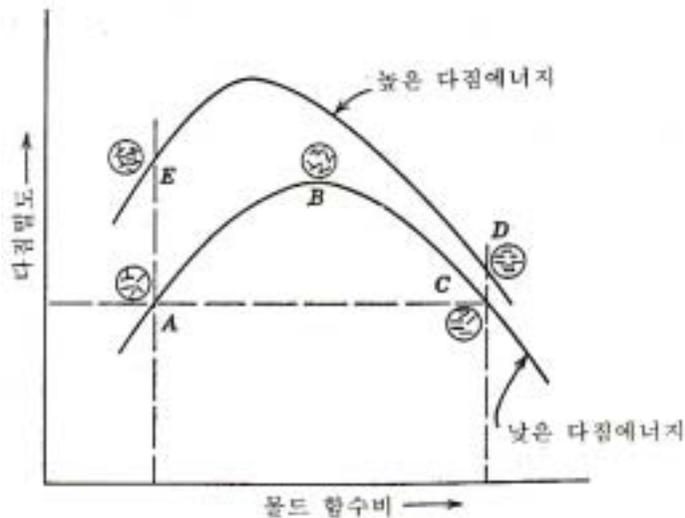


Fig. 2.7 Effects of Compaction on Structure



4) 다짐이 지반응력에 미치는 영향

다짐으로 인한 지반 내 응력을 고찰하기 위하여, 지반에 정하중이 작용하는 경우의 응력변화를 살펴보기로 한다. 그림 2.8은 오이도미터 시험에서 재하-제하 시험에 대한 유효응력경로, 전응력경로, 전응력에서 정수압을 뺀 응력경로를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터, 구속된 시료에 하중을 가하면 정(Positive)의 과잉간극수압이 나타나고, 하중을 제거하면 부(Negative)의 과잉 간극수압이 나타남을 알 수 있다. 그림 2.8에 보인 재하-제하 사이클을 따라 (σ_v 를 400KN/m^2 에서 800KN/m^2 으로 증가시킨 후 다시 400KN/m^2 으로 감소) 수평 유효응력은 200KN/m^2 에서 320KN/m^2 으로 증가되며, 수직유효응력에 대한 수평유효응력비, K는 0.5에서 0.8로 증가함을 보였다. 따라서 구속된 시료에 정하중을 작용시켰다 제거하면 횡 방향 유효응력은 증가함을 알 수 있다.

어떤 특정구조를 갖는 세립토는 그 구조에 상응하는 평형함수비를 갖는다. 즉 물의 출입이 자유롭다면 어떤 구조의 흙은 그 구조에 상응하는 양만큼의 물을 흡수하게 될 것이다. 일반적으로 최적함수비 또는 건조측에 있는 세립토의 함수비는 평형 함수비보다 작다. 따라서 물의 결핍상태가 나타난다. 만일 이때 물의 공급이 이루어지지 않는다면, 수분결핍에 따fms 모관력에 의한 메니스커스의 형성 및 간극수압에 의한 인장력(Pore water tension)이 발생한다. 흙은 정하중 또는 동하중으로 다질 수 있으며, 이때 자유수의 공급이 없다면 부의 간극수압이 발생하게 될 것이다.

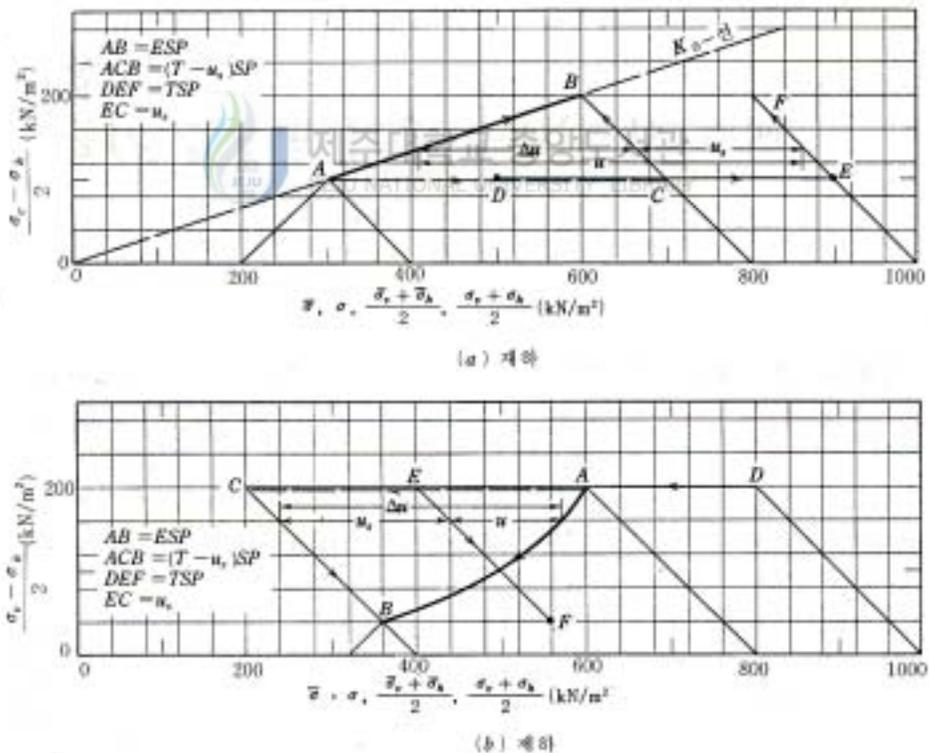


Fig. 2.8 Stress Paths for Oedometer Test

그림 2.9는 Lambe가 1961년에 Kaolinite에 대한 다짐시험을 실시한 후, 간극수압을 비롯한 다짐결과를 인용하여 보인 것이다. 다짐 시험방법으로 정적 다짐시험과 반죽다짐시험을 이용하였으며 이 두 시험의 결과는 그림 2.9c에 보인 바와 같이 거의 같은 함수비-건조밀도 관계를 나타내었다. 밀도-함수비 곡선 위에는 각 함수비에 대응하는 측정간극수압을 도시하였다. 이 시험결과로부터 두 가지 사항을 알 수 있는데 첫째는 주어진 밀도 및 함수비에서 정적다짐으로 다진 경우에는 간극수압에 의한 인장력(Pore water tension)이 반죽다짐보다 크게 나타난다는 점과 간극수압인장력은 물드함수비가 증가할수록 작은 값을 갖는다는 점을 발견할 수 있다.

그림 2.9a는 다짐시료를 건조시킬 때 나타나는 체적 수축값을 보인 것이다. 건조 수축의 크기는 입자의 배열이 평행할수록 증가하는 경향이 있다. 건조수축결과로부터 반죽다짐시험이 정적 다짐시험보다 입자를 분산구조화시킴을 알 수 있다.

요약하면, 정적이든 동적이든 다짐은 현저한 크기의 전응력과 간극수압의 변화를 야기한다는 것이다. 이때 발생하는 응력의 특성 및 크기는 흙의 종류 및 다짐에너지의 크기에 따라 달라진다. 일반적으로 다짐은 횡방향 유효응력을 증가시킨다.

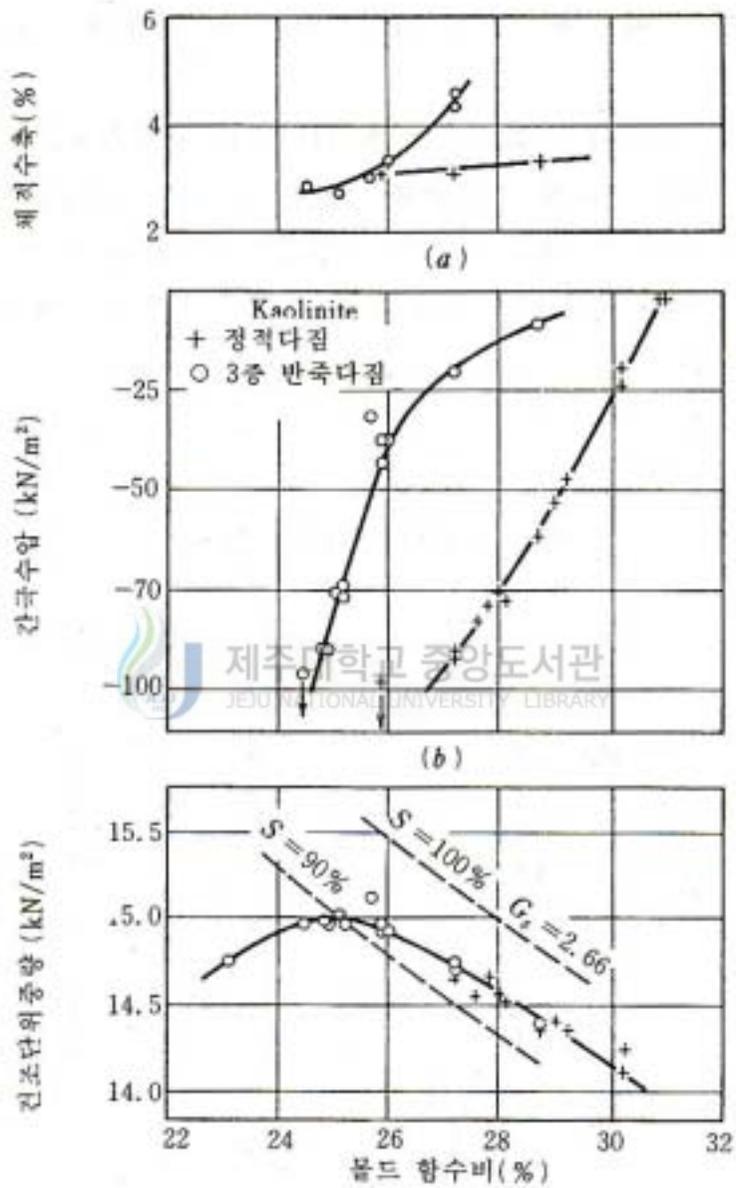


Fig 2.9 Pore Pressures in Compacted Kaolinite

5) 다짐이 흙의 공학적 거동에 미치는 영향

세립토는 다짐의 특성 및 크기에 따라 다짐된 흙의 공학적 거동에 상당한 영향을 미친다. 이러한 영향의 예를 그림 2.10에서 2.12까지 나타내었으며, 표 2.1에 나타내었다.

그림 2.10은 Lambe가 1962년 Siburua점토에 대하여 다짐 c 투수시험을 실시한 그림으로 그림에 나타난 바와 같이 함수비가 증가할수록 건조 측 다짐에서는 투수계수가 감소하며, 습윤 측 다짐에서는 투수계수가 약간 증가한다. 다짐에너지를 증가시키면 투수성은 감소하는데, 이것은 다짐에너지 증가가 건조밀도를 증가시켜, 흐름을 용이하게 할 수 있는 간극을 감소시키며, 입자의 방향성도 증가시키기 때문이다.

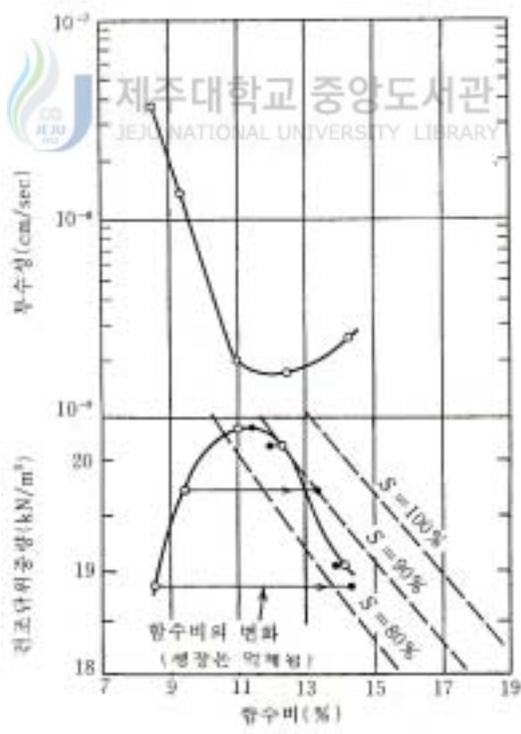


Fig. 2.10 Compaction-Permeability-Tests on Siburua

그림 2.11은 같은 밀도에서 포화된 두개의 점토시료의 특성을 비교한 것이다(Lambe, 1962). 이때 하나의 시료는 최적함수비의 건조 측으로 다진 것이며, 또 다른 하나는 습윤 측으로 다진 것이다. 낮은 응력에서는 습윤 측 다짐시료가 건조 측 다짐시료보다 압축성이 크다. 그러나 높은 응력에서는 건조 측 다짐시료가 습윤 측 다짐시료보다 압축성이 더 크다는 것을 알 수 있다.

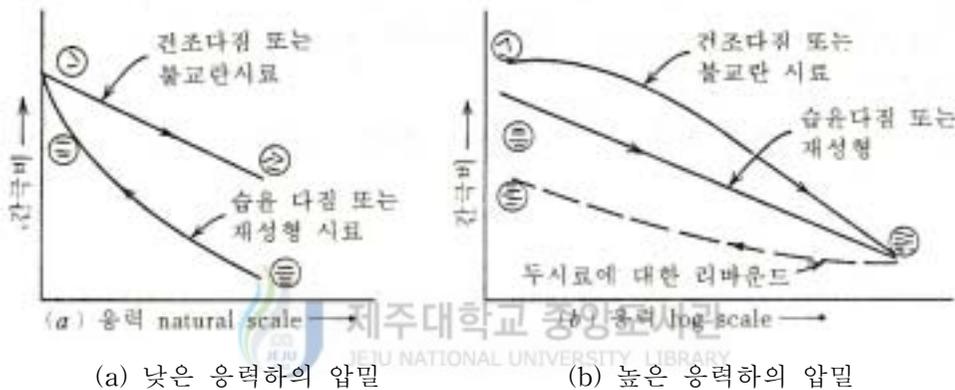


Fig. 2.11 Effect of One-Dimensional Compression on Structure

Seed 와Chan(1959)의 시험결과를 그림 2.12에 나타내었다. 이 그림은 함수비가 Kaolinite 다짐시료의 구조 및 응력-변형률 관계에 미치는 영향을 나타내고 있다. 건조 측으로 다진 시료는 습윤 측 다짐시료보다 강성 및 강도가 크다. 시료의 입자 배치과정에서 나타나는 전단변형률은 다짐 동안에 나타나는 흙 구조의 차이를 어느 정도 없애줄 수 있다.

토질 기술자는 다져진 흙의 거동뿐 아니라, 완성된 구조물로서의 흙의 거동도 고려하여야 한다. 특히 안정문제나, 침하문제가 가장 지배적인 문제일 경우는 완성된 구조물의 거동이 더욱 중요하다.

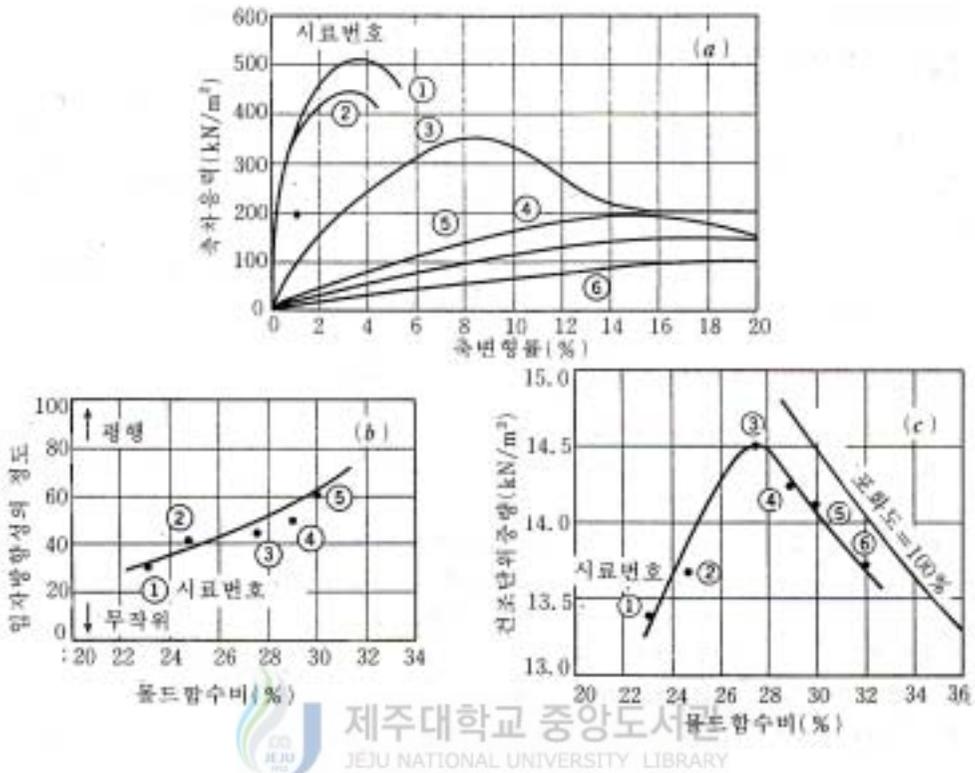


Fig 2.12 Influence of Molding Water Content on Structure and Stress-Strain Relationship for Compacted Samples of Kaolinite

(a) 다짐시료에 대한 응력-변형률 관계

(b) 입자방향성과 함수비의 관계 (c) 건조밀도와 함수비 관계

충분히 다짐시공이 된 흙에서도 시간경과에 따라 많은 변화가 있을 수 있다. 예를 들어, 댐의 심벽에 있는 다져진 흙 요소를 생각해 보면 댐의 축조높이가 증가 할수록 흙 요소의 전응력도 증가할 것이다. 댐이 완성되어 담수하게 되면, 물의 침투가 일어나 다져진 흙의 포화도는 증가할 것이다. 따라서 흙댐을 설계하는 경우는, 다져진 흙의 강도와 압축성뿐 아니라, 전응력의 증가 및 침투수에 의하여 포화된 후의 흙 특성도 고려하여야 한다. 표 2.2는 건조다짐과 습윤다짐을 비교하였다(Soil-mechanics, SI-version.1979)

Table 2.2 Comparison Dry of Optimum with Wet of Optimum Compaction

특 성	비 교
구 조 입자배열 물의 흡입력 (water deficiency) 보존성(permanence)	건조측이 더 임의배열을 이룬다. 건조측이 큼, 따라서 건조측이 더 많은 물을 흡수하여 더 많이 팽창하고, 더 낮은 간극수압을 나타낸다. 건조측이 변화에 민감하게 반응
투수성 크 기 보 전 성	건조 측의 투수성이 더 크다 침투가 일어나면 건조 측 투수성이 훨씬 더 많이 감소한다
압축성 크 기 속 도(rate)	낮은 응력에서는 습윤측이 크고 높은 응력에서는 건조측이 크다. 건조 측의 압밀속도가 더 빠르다
강 도 재성형시 비배수 배 수 포화후 비배수 배수 파괴시 간극수압 응력-변형계수 예민비(sensitivity)	건조측이 훨씬 크다. 건조측이 약간 크다. 팽창을 방지한 경우 건조측이 약간 더 크다. 팽창을 허용하는 경우 습윤 측이 더 커질 수 있다. 같거나 건조측이 약간 크다. 습윤 측이 크다. 건조측이 훨씬 크다. 건조측이 더 예민성이 크다.

2.4 기존 다짐밀도 측정시험방법

1) 실내 다짐시험방법

지반공학에서 다짐(Compaction)이란 타격, 누름, 반죽, 진동 등의 인위적인 방법으로 흙에 에너지를 가하여 흙 입자간의 공기를 배출시킴으로써 흙의 밀도를 증대시키는 것을 의미한다. 다짐은 공극을 감소시키는 면에서 압밀과 같지만 압밀은 공극내의 공극수를 배출시키는 반면 다짐은 공극내의 공기를 배출시키는 점이 상이하며, 다짐은 압밀과 달리 급속히 진행되는 점이 다르다.

흙의 다짐을 합리적인 근거에 의하여 고려하게 된 것은 1933년 프록터(Proctor)가 흙댐의 시공과 관련하여 다짐시험방법과 공사에의 적용방법을 발표한 이후이며, 이것을 표준 프록터시험(Standard proctor test)이라고 하며, 현재 프록터가 제안한 다짐시험방법은 각국에서 다소 수정하여 광범위하게 이용되고 있다. 우리나라에서도 이 시험을 근간으로 해서 KS F 2312(미국은 ASTM D 698, D 1557, 일본은 JSF T 711-1990)에 규정하여 이용되고 있다.

(1) 다짐시험 방법

일반적인 실내 다짐시험방법은 2.5kg의 래머를 사용하여 305mm의 낙하고를 유지하는 표준다짐시험과 큰 중량의 롤러가 등장하면서 다짐에너지의 증가함에 따라 좀 더 현장조건에 근접한 다짐방법이 필요함에 따라 기존의 표준다짐시험을 개량할 필요가 있었고 이에 개량된 다짐시험방법을 수정다짐시험이라 한다. 수정다짐시험은 4.5kg의 래머를 이용하여 457mm의 낙하고를 유지하여 다지는 방법이다. 그림 2.13은 표준다짐에서 이용되는 물

드와 래머를 나타낸 것이며 표 2.3은 한국공업규격에 의한 실내다짐시험의 종류를 도시한 것이다.



Fig. 2.13 Setup for Standard Compaction Test

Table 2.3 Types of Compaction Tests

방법	래머무게 (kg)	낙하고(cm)	각층당 타격회수	층수	몰드직경 (mm)	최대허용 입경(mm)
A	2.5	30	25	3	100	19
B	2.5	30	25	3	150	37.5
C	4.5	45	25	5	100	19.0
D	4.5	45	55	5	150	19.0
E	4.5	45	92	3	150	37.5

(2) 다짐곡선

수차례에 걸친 다짐시험의 결과로부터 얻어진 건조단위중량(γ_d) - 함수비(w) 관계를 나타낸 그림 2.14와 같은 그래프를 다짐곡선이라고 한다. 이 그래프의 정점에서의 각각의 값을 최대건조단위중량(γ_{dmax}), 최적함수비(w_{opt} 또는 OMC ; Optimum Moisture Content)라고 하며 현장다짐의 기준이 된다. 이 그림에서는 사질토와 점성토의 다짐곡선을 비교하여 나타내었는데, 일반적으로 점성토가 사질토보다 간극비(또는 함수비)가 크고 건조단위중량이 작은 것과 동일한 경향이라는 것을 알 수 있다.

일반적으로 다짐에너지가 증가하면 흙은 조밀해지지만, 소성이 있는 점성토에서는 함수량이 많은 상태에서 다짐에너지가 반복 작용하면 다짐상태가 오히려 나빠져서 강도가 저하되는데 이를 과도전압 또는 과전압이라 한다. 과도전압은 함수비가 높은 점성토에서 보이는 현상으로서 특히 화강 풍화토(Decomposed granite)에서 많이 나타난다.

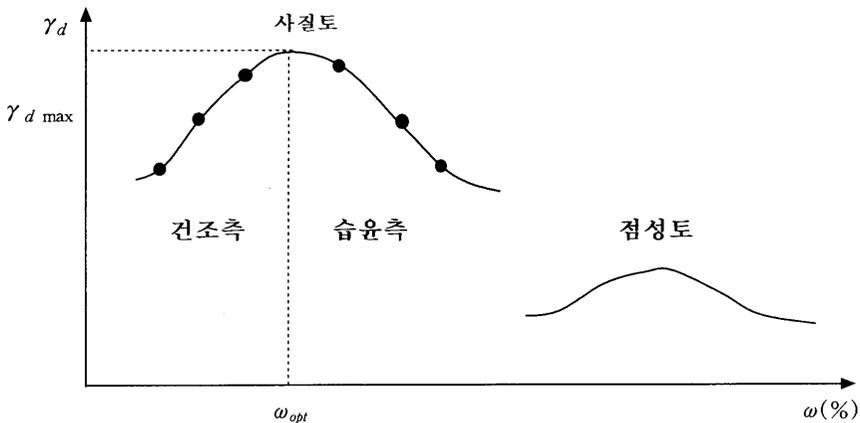


Fig. 2.14 Compaction Curve

(3) 영공극 곡선

영공극 곡선은 영공기 간극곡선 또는 포화곡선이라고도 하며, 주어진 함수비에 대한 이론적 최대 건조단위중량 곡선을 의미한다. 영공극인 경우 임의의 함수비에서의 최대건조밀도는 다음의 식으로 구할 수 있다. 여기서, 주의할 것은, 영공극 상태는 어떤 불포화상태의 흙에 물을 가하여 포화시킨 상태가 아니고, 실제로는 거의 불가능할 수도 있지만 가상적으로 공기가 없어질 때까지 다져서 포화시킨 상태라는 것이다.

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \quad (2.1)$$

100% 포화된 경우, $e = wG_s$ 이므로

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + wG_s} = \frac{\gamma_w}{w + \frac{1}{G_s}} \quad (2.2)$$

여기서, γ_{zav} : 영공극 단위중량

γ_w : 물의 단위중량

e : 간극비

G_s : 흙 입자의 비중

w : 함수비

최대 건조단위중량 곡선이란 어떤 함수비 상태의 흙을 공기 간극이 완전히 없어져서 포화도가 100% 될 때까지 이상적으로 다졌을 때의 함수비와 건조단위중량의 관계를 나타낸 것이므로, 동일한 함수비일 때에는 그림 2.15와 같이 공기 간극이 남아있는 상태의 다짐 곡선보다 항상 위쪽에 위치한다.

그림 2.15의 다짐에너지에 따른 다짐곡선의 형태에서 알 수 있듯이, 함수비의 작은 변화에 대해 최대 건조단위중량은 크게 변화한다. 즉 최대 건조단위중량은 함수비의 변화에 민감하다.

다짐에너지가 클수록 최대 건조단위중량은 증가하고, 최적 함수비는 감소한다.

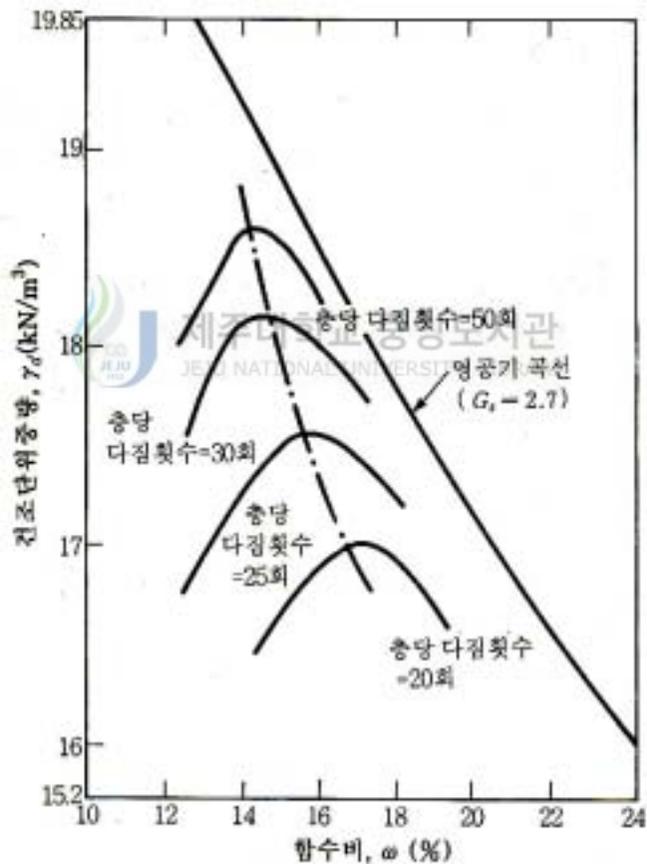


Fig. 2.15 Influence According to Compaction Energy and Zero-air-void Curve

(4) 함수비의 변화에 따른 흙 상태의 변화

다짐 시 함수비에 따라 흙의 상태는 각각 다르게 되는데, 호겐토글러(Hogentogler)는 이것을 그림 2.16과 같이 4단계로 나누고 있으며 각 단계에 대해 설명하면 다음과 같다.

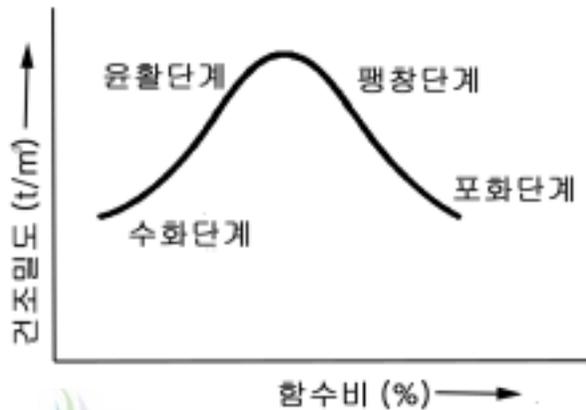


Fig. 2.16 Four Steps of Compaction Curve

가. 수화(水和)단계(반고체상 영역)

반고체 상태로 흙이 존재하며 함수량이 부족하여 흙 입자 사이에 접촉이 일어나지 않고 큰 간극이 존재한다. 충격력이 주어지면 개개의 입자가 이동하게 되며 다짐효과는 별로 나타나지 않게 되고 밀도가 낮은 다짐 흙을 얻는다.

나. 윤택단계(탄성체적 영역)

함수비의 증가로 수화단계를 넘으면 수분의 일부는 자유수로 존재하여 흙 입자의 이동을 돕는 윤택재 역할을 하게 되고 다지게 되면 흙 입자 상호간에는 접촉이 이루어지기 시작한다. 충격을 가하면 개개의 입자의 이동이 일어나지 않고 간극비가 줄어들어 안정된 상태로 되어간다. 함수비를 점차

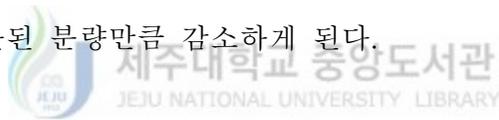
적으로 증대시키면 이 단계에서의 최대함수비 부근에서 최대건조단위중량을 보이게 되고 이 때 함수비는 최적함수비가 된다.

다. 팽창단계(소성적 영역)

함수비가 더욱 증가하여 최적함수비를 넘게 되면 증가된 분량의 수분은 유효재로서의 작용뿐만 아니라 보다 다져진 순간에 잔류공기를 압축시키는 작용을 더하게 된다. 이러한 결과로 다져진 흙은 다짐충격을 받아 압축되며 충격을 제거하면 팽창현상이 일어난다.

라. 포화단계(반점성 유체적 영역)

더욱 함수비를 증대시키게 되면 팽창단계로부터 증가된 수분은 흙 입자와 치환되며 실제적으로 포화된 결과가 된다. 건조단위중량은 흙 입자가 수분에 의해서 치환된 분량만큼 감소하게 된다.



2) 현장 다짐방법

실제 현장에서 다지는 방법을 구체적으로 제시하기 위하여, 우선적으로 성토재로 사용될 흙을 채취하여 실내에서 다짐시험을 실시한다. 실내시험으로부터 성토재료로 쓰일 흙의 최적함수비와 최대건조밀도를 구한 후 현장다짐을 계획한 후 현장에 적용하게 된다.

일반적으로 현장다짐은 층 다짐으로 실시하게 되는데 다짐장비에 의하여 다짐에너지를 가하는 방법은 압력, 충격, 진동 등 있다. 현장다짐의 다짐도는 포설두께, 다짐압력을 받는 면적, 다짐압력의 강도, 장비의 종류, 다짐횟수 등에 의해 영향을 받는다. 다짐장비의 선택은 흙의 종류, 함수비, 공사의 종류 등을 고려하여 선택하게 된다. 통일분류법에 의한 흙의 분류에 따른 다짐장비의 효율은 표 2.4와 같다(천병식, 지반공학, 2003).

Table 2.4 Properties of Compaction According to Unified Soil Classification System

구분	다짐특성 및 장비	최대건조밀도 AASHTO(pcf)	성토재료	기초지반
GW	좋음 : 트랙터, 고무타이어, 금속바퀴 또는 진동롤러	125 ~ 135	매우 안정	좋음
GP	좋음 : 트랙터, 고무타이어, 금속바퀴 또는 진동롤러	115 ~ 125	비교적 안정	나쁨~보통
GM	좋음 : 고무타이어 또는 경량 양축롤러	120 ~ 135	비교적 안정	보통~나쁨
GC	좋음~보통 : 고무타이어 또는 경량 양축롤러	115 ~ 130	비교적 안정	좋음~보통
SW	좋음 : 트랙터, 고무타이어 또는 진동롤러	110 ~ 130	매우 안정	보통~나쁨
SP	좋음 : 트랙터, 고무타이어 또는 진동롤러	100~120	밀한 상태 시 비교적 안정	나쁨
SM	좋음 : 고무타이어 또는 양축롤러	110 ~ 125	밀한 상태 시 비교적 안정	나쁨
SC	좋음~보통 : 고무타이어 또는 양축롤러	105 ~ 125	비교적 안정	보통~나쁨
ML	좋음~나쁨 : 고무타이어 또는 양축롤러	95 ~ 120	낮은 안정성, 고밀도 요구	부적합
CL	좋음~보통 : 고무타이어 또는 양축롤러	95 ~ 120	좋은 안정성	부적합
OL	보통~나쁨 : 고무타이어 또는 양축롤러	80 ~ 100	불안정 사용불가	부적합
MH	보통~나쁨 : 고무타이어 또는 양축롤러	70 ~ 95	낮은 안정성 사용불가	부적합
CH	보통~나쁨 : 양축롤러	80 ~ 105	보통 안정성, 팽창 시 불안	부적합
OH	보통~나쁨 : 양축롤러	65 ~ 100	불안정 사용불가	부적합
PT	부적합	-	사용불가	부적합

(1) 현장 다짐장비

다짐장비는 탬퍼(Tamper)와 롤러로 구분된다. 탬퍼는 비교적 경량의 수직 충격하중을 연속적으로 작용시켜 다짐을 하는 래머류의 장비이다. 탬퍼는 작업능력에 한계가 있기 때문에 롤러로 접근이 어렵고 수평포설두께가 15cm를 넘지 않는 곳에 적용 가능하다. 롤러는 강륜롤러, 양측롤러, 공기압 타이어 롤러, 진동롤러 등 그 종류가 다양하다. 롤러는 광범위한 면적을 비교적 빠르게 큰 다짐압력으로 작업을 할 수가 있다. 표 2.5는 다짐장비의 종류를 표로 나타낸 것이다.



Table 2.5 Compaction Equipments

다짐 기계 명		적 용 지 반	개 요		
대 분 류	소 분 류				
정적 하중에 의한 다짐 기계	로드롤러 (road roller)	Macadam roller	쇄 석 층 표면이 매끄러운 원통형 철바퀴를 차륜으로 하는 자주식 다짐기계. 철바퀴의 배치에 따라 3륜식의 매키덤형과 2륜식 및 3륜식의 텐덤형이 있다. 주로 포장기계로서, 노반이나 아스팔트 포장의 다짐에 사용된다.		
		Tandam roller			
	타이어롤러 (tire roller)		공기 주입 타이어의 특성을 이용해서 다짐을 행하는 기계. 타이어의 접지압은 타이어 하중과 공기압과의 관계로서 변화하고, 일반적으로 공기압을 올리면 다짐효과는 크게 되고, 낮추면 지지력이 낮은 지반에도 적용될 수 있도록 된다. 자주식과 피견인식이 있으며, 바라스터의 부가도 가능하다.		
탬핑롤러 (tamping roller)	sheep foot roller grid roller taper foot roller turn foot roller	연약 점성 토 지반	롤러 표면에 돌기를 붙인 것으로, 그 형상에 따라 여러 가지로 나누어진다. 이들은 돌기의 선단에 하중을 집중할 수 있으므로, 다른 롤러에 비해서 깊은 곳까지 다짐효과가 미친다. 자주식과 피견인식이 있으며, 바라스터의 부가도 가능하다.		
		동적 하중에 의한 다짐 기계	진동롤러 (vibration roller)	사질 토 지반	롤러에 진동기를 붙여서 진동에 의해 흙의 변형저항을 작게 해서, 작은 하중에서 큰 다짐효과를 얻는 것. 종류로서는 탠덤형이 많고, 철바퀴와 타이어의 콤바인더형에는 타이어 구동형과 타이어 결합형이 있다. 자주식과 피견인식이 있다.
					진동컴팩터 (vibration compactor)
			충 격	탬퍼 (tamper)	

(2) 다짐장비에 따른 다짐특성

점도가 낮은 점토(Lean clay)의 현장다짐곡선은 그림 2.17과 같으며 (Yoder,1959), 다짐횟수에 따라 건조단위중량은 증가한다. 그러나 다짐횟수가 8~10회를 넘으면 건조단위중량의 증가는 거의 없다. 경제적인 최대 건조단위중량은 약 10회 정도의 다짐에서 구할 수 있다.

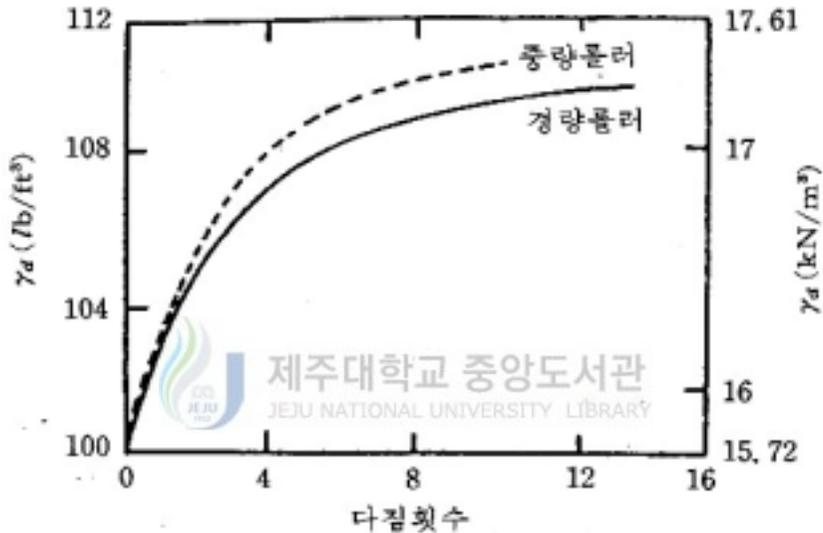


Fig. 2.17 Influence of the Field Compaction for a Lean Clay

그림 2.18은 바다모래에 대한 5회 다짐결과를 나타낸 것이다(ASCE, Vol.95, 1969). 상부의 건조단위중량이 작은 것은 진동에 대한 모래의 구속력이 부족하기 때문이다.

그림 2.19는 동일한 모래에 대하여 포설두께를 2.44m로 하고 롤러 다짐횟수를 각각 2, 5, 15, 45회로 하였을 경우에 깊이별 건조단위중량을 나타낸 것이다(ASCE, Vol.95, 1969).

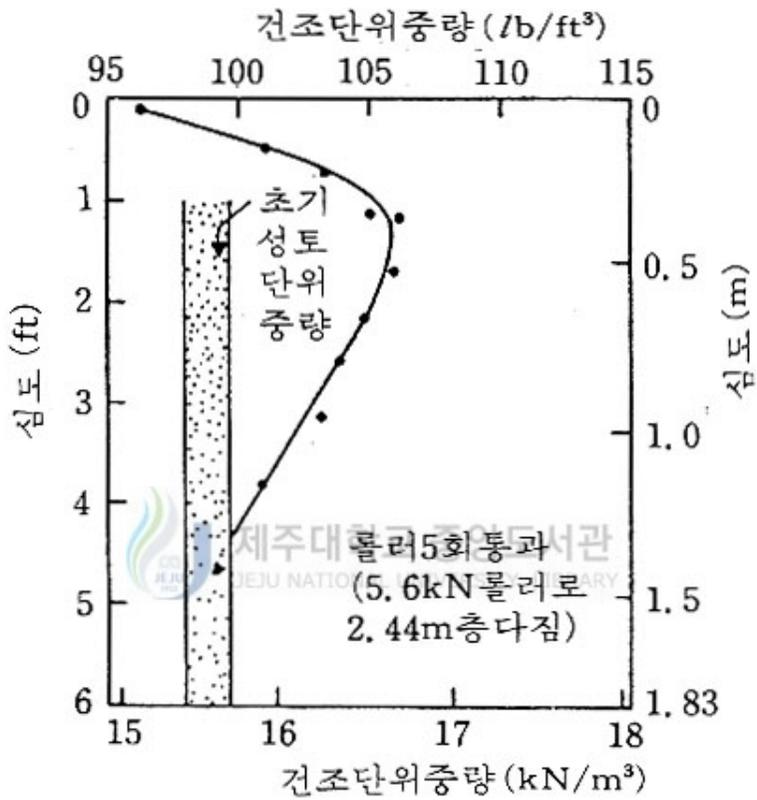


Fig. 2.18 Dry Unit Weight Variation with Depth
(the vibratory roller, 5 Passes)

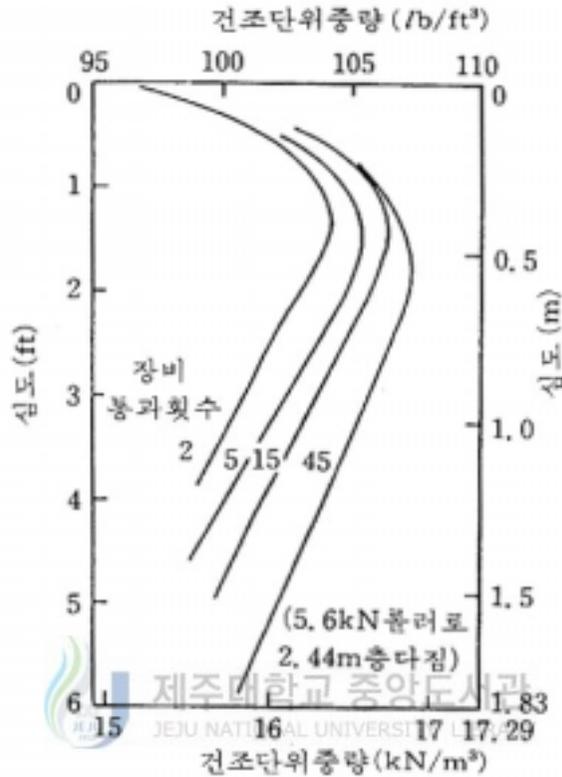


Fig. 2.19 Dry Unit Weight Variation with Depth According to Passing Number of Time of the Vibratory roller

그림 2.20은 최적함수비 보다 높은 현장함수비를 가진 사질토를 각기 다른 장비로 다질 때의 다짐횟수와 건조단위중량의 관계를 나타낸 것이다 (천병식, 지반공학, 2003).

모래, 자갈, 부순 돌 등의 점착력이 작은 흙은 진동에 의한 다짐이 효과적이다. 그림 2.21은 진동 장치가 있는 롤러로 다질 때의 다짐곡선으로서 사질토에서는 진동이 현저히 효과적이며, 실내 표준다짐시험에서보다 훨씬 높은 건조단위중량을 나타내고 있음을 알 수 있다.

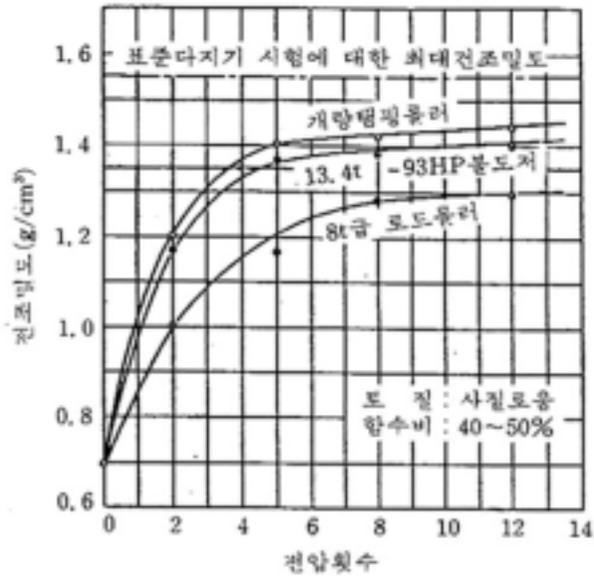


Fig. 2.20 Effects of Compaction According to Compaction Equipments

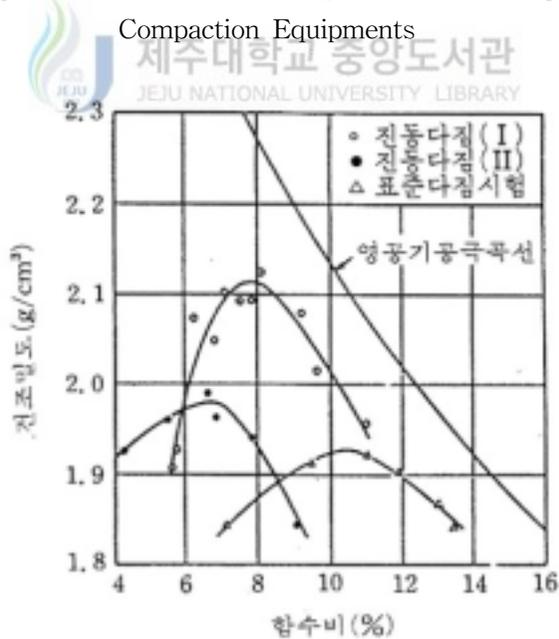


Fig. 2.21 Effects of Field and Laboratory Compaction for a Sand

(3) 현장 다짐 시공순서

성토재료는 고 함수비의 점성토에서 파쇄 된 경암에 이르기까지 여러 가지의 종류가 있고, 또 흙을 다짐하는 다짐기계도 많은 종류가 있기 때문에, 대상이 되는 성토재료의 다짐특성을 가장 효과적으로 발휘하게 할 수 있는 다짐기계의 선정이 중요하다. 또한, 다짐은 같은 토질이라도 함수비의 상태, 층의 두께, 다짐회수에 따라서도 현저하게 변하기 때문에, 효과적인 다짐을 행하기 위해서는 토질, 다짐기계, 시공함수비, 층의 두께 및 다짐 회수 등에 관해서 종합적인 검토를 행하는 것이 중요하다. 현장 다짐 순서는 다음과 같다.

가. 고르기

완성된 성토의 품질을 균등하게 하기 위해서는, 균질한 성토 재료를 일정한 두께로, 평평하게 고르는 것이 중요하다. 고르기 할 때 재료분리가 생기면 균질한 성토가 되지 않는다. 또, 다짐에 의한 한 층의 두께가 크게 되면, 일본토질공학회가 1990년 제시한 그림 2.22와 같이, 전압 면으로부터의 깊이의 증가와 함께 흙의 밀도가 감소되고, 다짐기계에 의한 전압 효과가 낮아지기 때문에, 소정의 밀도가 되도록 두께에서의 고르기를 행하는 것이 중요하다. 우리나라에서는 보통 다짐 전의 1층 성토고를 30cm로 하고 다짐 후에는 어떤 두께(예를 들면, 20cm)가 되도록 하는 대략적인 시공기준을 마련하기도 한다. 고르기 후는 강우 등에 의한 함수비의 증가를 방지하기 위해 계속적으로 빠르게 다짐을 완료하지 않으면 안 된다.

그림 2.22로부터, 깊이에 따라 건조단위중량이 상당히 다르다는 사실을 알 수 있으므로, 다짐 후의 건조단위중량이 기준에 맞는지를 확인하기 위

해 건조단위중량을 측정할 때는 가장 불리한 위치(1층 다짐에서 가장 깊은 곳) 부근에서의 값을 사용하는 것이 합리적이다.

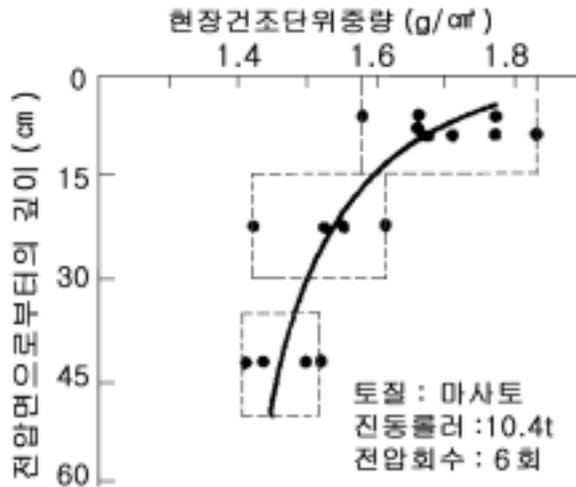


Fig. 2.22 Effect of Compaction with Depth

나. 다짐

고르기 된 흙을 타이어 롤러나 진동롤러 등의 다짐기계에 의해 소정의 상태까지 전압 할 때, 성토재료와 다짐기계의 적절한 조합이 중요하다. 토질조건과 성토의 구성부분에 따른 다짐기계의 조합은 과거의 경험과 실적에서 상당한 정도까지 파악되어 있다. 그러나 토질이나 다짐기계의 각각의 조건이 약간 달라도 다짐 효과가 크게 변할 가능성이 있기 때문에 현장에서는 그때마다 검토를 행하고 토질과 다짐기계의 최적 조합을 행하도록 하는 것이 중요하다.

그림 2.23은 점토질 모래(통일분류 기호 : SC, 최대 입경 4.76mm)에 대해서 콘크리트제 토조(길이 24m, 폭 3.5m, 깊이 1m) 내에서 현장에서 사용되는 다짐기계를 이용하였을 때의 다짐곡선과 JIS A 1210 「타격에 의

한 흙의 다짐 시험방법」에 의한 다짐곡선을 나타낸 것이다(石井 等; 1987). 토조 시험에서의 다짐기계의 차이, 또 실내시험에서의 몰드 내의 체적이나 래머에 의한 타격방법의 차이에 따라, 다짐에너지가 각각 다르기 때문에, 다짐곡선도 다르고 최대 건조단위중량 및 최적 함수비가 다르다. 이와 같이, 동일한 흙을 다짐한 경우도, 다짐기계나 래머의 종류 등에 따라, 다짐곡선이 크게 변하는 것에 주의하지 않으면 안 된다.

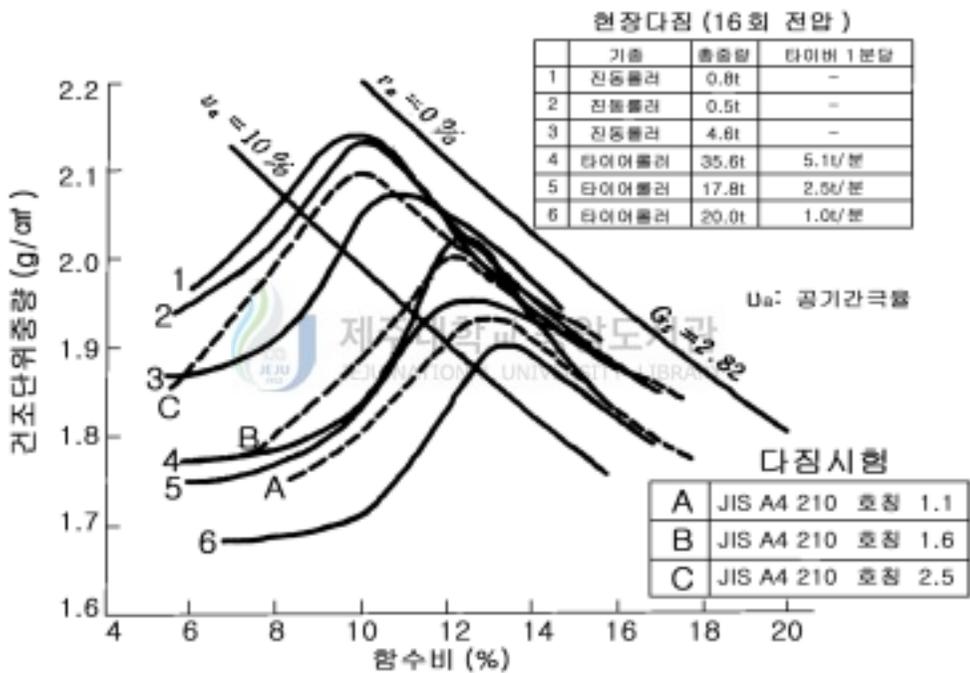


Fig. 2.23 Compaction Curves According to Compaction Equipments

다. 함수비 조절

흙을 다짐할 때, 토질 및 다짐의 조건에 의해 정해지는 최적 함수비의 상태에서 시공하는 것이 바람직 하지만, 성토재료의 시공 시의 함수비가 이보다 현저하게 달라져 있는 경우도 있다. 이 경우 살수나 건조를 행하

여 함수비를 조절할 필요가 있다. 최적 함수비보다 낮은 함수비의 경우에는 살수나 전압 회수를 늘이는 등의 방법으로 최대 건조밀도를 얻을 수 있으나, 최적 함수비보다 높은 함수비의 경우는, 건조에 의해 저하 가능한 함수비에는 한계가 있고, 여름철의 조건이 좋은 때에도 하루에 수 퍼센트 정도이므로, 현장의 흙이 습윤 측으로 건조에 많은 시간이 걸린다. 따라서 설계 전압회수(또는 다짐에너지)에서의 최적함수비보다 높은 함수비 상태에서 다질 수밖에 없을 경우에는 전압을 위한 1회 성토량을 줄여서 1층의 평균적인 다짐효과를 높이고, 현장시험에 의해 이 때의 평균건조단위중량을 확인 시험하는 것도 한 방법일 것이다. 그러나 이 때 높은 함수비에 의한 과도전압의 발생을 막기 위해 전압회수를 조절하도록(줄이도록) 해야 할 것이며, 전압회수는 현장 전압시험에 의해 결정되어야 할 것이다. 또 성토체에 Pet mat 등의 보강섬유를 부설하고 다짐으로서 과잉 간극수압에 의해 발생하는 과도전압을 줄이고 다짐효과를 높이는 방법도 강구해 볼 수 있으나 이에 대해서는 연구나 시공실적이 거의 없어 앞으로 이에 대한 연구가 필요할 것이다.

때때로 성토재료 채취장소에서 트렌치 등에 의해 함수비 저하를 피하는 것도 행해진다. 또, 성토재료의 시공 시의 함수비에 걸 맞는 다짐기계를 선택하는 것도 중요하게 된다. 성토재료의 함수비가 높아 건조시켜야 할 경우, 일반적으로 그림 2.24와 같은 장비를 사용하여 노상을 파 일구는 작업을 반복하지만, 이런 방법은 겨울에는 별 효과가 없다. 특히 화산회질 점성토와 같이 이런 방법으로는 잘 건조되지 않는 흙의 경우에는 드물게 열풍건조기를 사용하기도 한다.

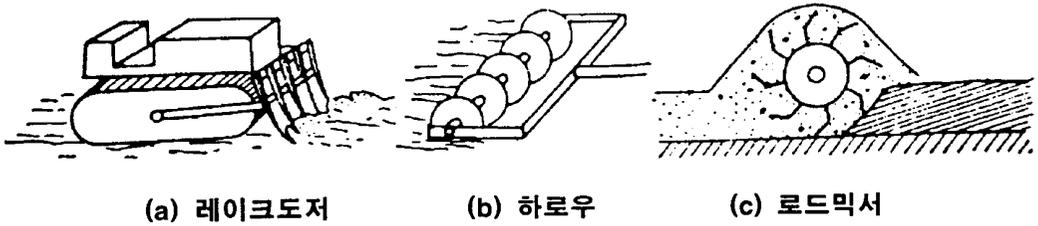


Fig. 2.24 Drying of Rod Soil

(4) 다짐 품질관리

흙의 다짐 품질관리는 성토시공 중에 다짐된 흙이 설계 시에 예상한 상태까지 다짐되어 있는지 어떤지를 확인하기 위해 실시된다. 품질관리를 실시함으로써, 시공 중의 성토가 각 단계에서 소정의 다짐 규정치를 만족하고 있는지 판정가능하고, 또 시공 중에 생기는 문제점도 조기에 발견할 수 있다. 성토의 다짐관리는, 그림 2.25에서와 같이 품질을 규정하는 방식과 공법을 규정하는 방식으로 대별된다.

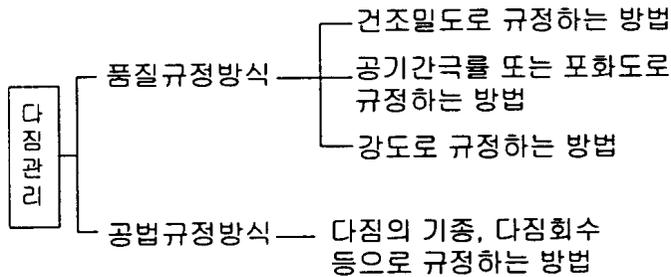


Fig. 2.25 Quality Control of Compaction

품질 규정방식은, 일반적인 성토 재료에 적용되며, 건조 단위중량으로 규정하는 방법, 공기 간극률 또는 포화도로 규정하는 방법 및 강도로 규정하는 방법 등이 있다. 일반적으로 건조 단위중량 으로 규정하는 것이

기본이지만, 입경이 큰 자갈을 포함하는 흙 등 기준이 되는 최대 건조밀도를 구하기 어려운 흙이나 점성토에 대해서는 공기 간극율 또는 포화도로서 규정하는 방법이 적용되고 있다.

건조 단위중량으로 규정하는 방법은, 시공된 성토의 건조단위중량과 기준이 되는 다짐시험에서의 최대 건조단위중량의 비(다짐도)가 규정치 이상이 되도록 관리하는 방법이다.

공기 간극율 또는 포화도(식 2.3, 2.4 참조)로 규정하는 방법은, 시공된 성토의 공기 간극율 또는 포화도가 규정된 범위 내에 들어가도록 시공하는 방법이고, 세립토를 많이 포함하는 흙에 대해서 적용되는 경우가 많다.

강도로 규정하는 방법은, 시공된 성토의 강도·변형특성을 콘 등의 관입저항, 현장CBR, 지반반력계수(K치) 등의 값에 의해 규정하는 방법이다.

$$S = \frac{w}{\frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{1}{G_s}} (\%) \quad (2.3)$$

$$n_a = 100 - \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \left(\frac{100}{G_s} + w \right) (\%) \quad (2.4)$$

여기서, S : 포화도(보통 85~95%로 함)

w : 흙의 함수비(%)

γ_w : 물의 단위중량

γ_d : 흙의 건조단위중량

G_s : 흙의 비중

n_a : 공기간극율(보통 2~10% 로 함)

한편 공법규정방식은 사용하는 다짐기계, 다짐회수 등의 공법 그 자체를 규정하고, 성토 시공 중은 다짐기계, 다짐 회수 등의 확인을 행하는 것으로 관리하는 방법이다. 이 방법은 압괴재료에 의한 성토와 같이 함수비, 현장밀도, 강도 등의 측정이 어려운 재료인 경우에 이용되고, 현장에서는 필요에 따라서 본 시공 전에 시험시공을 실시하고, 다짐기계나 다짐회수 등을 결정한다.

어떤 관리방법을 채용할지는 토질, 공사의 성격·규모 등의 조건에 따라 결정된다. 우리나라 도로의 품질관리시험 종목 및 빈도는 표 2.6과 같으며, 각 기관에서의 다짐 관리방법과 규정치는 표 2.7(도로공사표준시방서,1996)과 2.8(일본토질공학회,1990)과 같다.

Table 2.6 Compaction Management Index

종 별	시 험 종 목	시 험 방 법	시 험 빈 도
노 체, 노 상	함 수 비	KS F 2306	200m마다, 필요에 따라
	다 짐	KS F 2312	5,000 m^3 마다
	현장밀도	KS F 2311	200m마다
보 조 기 층	함 수 비	KS F 2306	10a마다, 필요에 따라
	입 도	KS F 2302	10a마다, 1회 이상
기 층 (혼합골재)	액성한계	KS F 2303	필요시마다
	소성한계	KS F 2304	
	다 짐	KS F 2312	2,500 m^3 마다
	두 께	—	10a마다, 1회 이상
	현장밀도	KS F 2311	10a마다, 250 m^3 마다

Table 2.7 Compaction Management Method of Ministry of Construction & Transportation

구 분	공 종	노 체	노 상		비 고
			하 부	상 부	
	다 짐 두께 (cm)	30이하	20이하	20이하	
	최 대 입 경 (mm)	300이하	150이하	100이하	
	다 짐 도 (%)	90이상	90이상	95이상	KSF2311, KSF2312
	C B R	2.5이상	5이상	10이상	KSF2320
	계 획 고 오 차 (cm)	+5	-	+3	
	# 4 체 통 과 분 (%)	-	-	25 - 100	
	# 200 체 통 과 분 (%)	-	-	0 - 25	KSF2309
	# 4체 통과분 중 #200체 통과분 (%)	-	50이하	-	KSF2304
	소 성 지 수(PI)	-	30이하	10이하	KSF2303, KSF2304
	프루프 로링시변형(mm)	-	-	5이하	
	3m직선자에의한요철(mm)	-	-	10이하	
평판재하시험 (kg/cm^3)	C.P	K30 15이상	K30 15이상	K30 15이상	KSF 2310 재하판 규격 30cm
	A.P	K30 20이상	K30 20이상	K30 20이상	
	다 짐 방 법	A.B	C.D.E방법		
	사 용 금 지 조 건	<ol style="list-style-type: none"> 1. 유기성 점토, 이토 함유한 점토 2. 액성한계 50% 이상되는 재료 3. 소성한계 25% 초과되는 재료 4. 건조밀도 $1.5 T/m^3$이하인 재료 5. 간극율 42% 이상인 재료 6. 유해물(나무토막, 뿌리)를 함유한 재료 			

Table 2.8 Compaction Management Method In Japan

기 관		日本道路公団 ^{*1}		旧國鐵 ^{*2}		日本住宅公団 ^{*2}	建設省 ^{*2}		農林水産省 ^{*3}	
구 분		노 체	노 상	하부성토	상부성토	성 토	노 체	노 상	토지개발 사업 필법	
다 집 관 리 방 법	다짐시 험 규정	KODAN A 1210	KODAN A 1210	JIS A 1210	JIS A 1210	JIS A 1210	JIS A 1210	JIS A 1210		
		호칭					1.6법	2.4법 2.5법	2.4법 2.5법	
	건조 단위 중량 으로 규정	다짐도	90% 이상 (92% 이상)	95% 이상 (97% 이상)	$K_{30} \geq 7$ <i>kgf/cm³</i>	$K_{30} \geq 11$ <i>kgf/cm³</i>	허용최대입경을 19.1mm→38.1m m로 바꾸어서 행함. 85% 이상	85% 이상	90% 이상	90% 이상
		공기 간극 율 또는 포화 도로 서 규정	공기 간극율	10 또는 15% 이하 (8 또는 13% 이하)	10 또는 15% 이하 (8 또는 13% 이하)		2~15%	10% 이하	15% 이하 (사질토) 10% 이하 (점성토)	2~10%
		포화도	—	—			85% 이상	85% 이상	85~95%	
시공함수비	자연함수비	최적함수비 부근				감독원 의 지시	감독원 의 지시	최적함수비 ±5% 이내		
성토재료에 관한 규정			최대입경 100mm 비화율 50% 이하	아래에 의함		일반토 : $q_c > 4 \text{ kgf/cm}^2$ 고함수비의 점 성토 : $q_c > 2 \text{ kgf/cm}^2$			조사·설계 에 의함	
특기 사항		<ul style="list-style-type: none"> ●다짐도의 규정치는 도로부의 각 구분 및 0.075mm체 통과분으로 분류해서 정하고 있다. ●노체, 노상은 상부, 하부의 두 개로 구분하고, 약간 규정이 다르다. ●암괴재료에 관해서는 공법 규정방식으로 관리한다. ●()는 RI로써 측정하는 경우의 관리기준치를 나타낸다. 		<ul style="list-style-type: none"> ●성토재료를 A군, B군, C군, D군, V군으로 구분해서 상부성토, 하부성토에의 적용구분을 정하고 있다. ●다짐도는 재료에 따라 $K_{30} \geq 7 \text{ kgf/cm}^3$ 까지 줄일 수 있다. 		<ul style="list-style-type: none"> ●재료에 관해서 입도분포에 대한 규정이 있다. 				

注) 참고문헌 *1 : 日本道路協會(1986) *2 : 日本道路公団(1983) *3 : 日本土質工學會(1979)

(5) 현장 다짐시공 후 흙의 성질

가. 다짐에 의한 흙의 구조변화

흙을 다졌을 때, 함수비에 따라 다짐 형태가 변화하는 것은 앞 절에서 기술했는데, 사질토의 경우는 함수비에 따라 흙 구조가 별로 변하지 않는다. 그러나 점성토의 경우, 그 함수비에 따라 흙 구조가 상당히 변화한다. 다짐곡선에서, 최적 함수비보다 낮은 함수비로 다진 것은 랜덤 구조를 취하지만, 함수비의 증가에 따라 랜덤의 정도가 감소되어 최적 함수비 이상에서는 불완전배향구조(분산구조)를 만든다. 또한 다짐방법(정적, 동적 등)의 차에 의해서도 구조의 차이가 생긴다. 정적(靜的) 압력에 의한 다짐 시에는, 전 층(全層)에 걸쳐서 불완전 배향을 만들지만, 동적인 램머에 의한 다짐에서는 큰 전단변형률에 의한 배향구조를 국부적으로 가지며, 전 층에 걸쳐서는 랜덤한 구조로 된다. 이것은 다짐방법에 의한 전단변형률의 발생방법의 차이에 기인하는 것으로, 응력-변형률 특성은 그림 2.26에 나타낸 바와 같이 서로 달라진다(Seed et al.,1961).

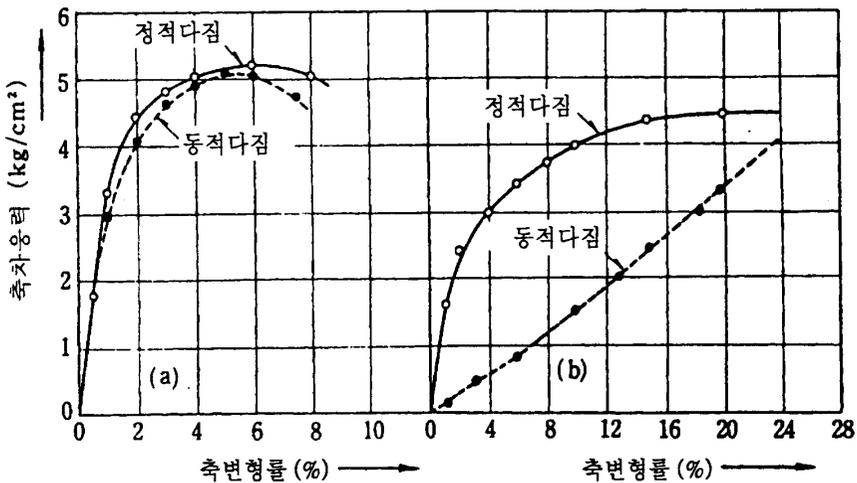


Fig. 2.26 Stress-Strain Relationship According to Dynamic and Static Compaction

나. 함수비의 영향

지반의 건조 단위중량이 같고 함수비가 서로 다른 지반을 다진 경우에 최적 함수비보다 큰 함수비로 다진 지반은 불안정하다. 왜냐 하면, 지반의 함수비가 크면 다짐 에너지를 가할 때에 과잉 간극수압이 발생되어 다짐에 저항하므로 잘 다져지지 않으며, 이렇게 다져진 지반은 압축성이 크기 때문이다. 따라서 지반은 작은 함수비로 다질수록 잘 다져지고 다진 후의 지반의 압축성이 적어서 유리하지만 목표로 하는 최대건조밀도를 얻기 위해서는 다짐에 큰 에너지를 필요로 하여 비경제적이다.

다짐된 시료의 함수비를 증가시키거나 포화시키면, 함수비가 작은 상태로 다짐된 시료일수록 압축변형이 커진다. 포화되면서 급격하게 압축변형이 일어나는 현상을 포화충격(Saturation shock)이라고 하는데, 이 현상은 최적 함수비로 다진 지반에서는 거의 일어나지 않고 최적 함수비보다 큰 함수비로 다진 지반에서도 발생되지 않는다. 따라서 최적 함수비보다 작은 함수비로 다질 때는 포화충격이 일어날 가능성이 있다.

여기서 문제가 되는 것은 최적 함수비 부근에서 다진 지반은 이후에 강우 등에 의해 함수비가 증가되어도 침하가 별로 발생하지 않는다고 하였다. 그런데, 이 최적 함수비라는 것은 다짐에너지에 따라 달라지므로 현장에서 어떤 다짐에너지를 사용한 최적 함수비를 사용했을 때에 대한 것인가 하는 문제가 남는다. 또한 함수비 증가에 의해 지반의 자중이 증가함으로써 생기는 하중에 의한 다짐 흡의 침하와 다짐 흡의 하부기초지반의 침하에 대해서는 별도의 검토가 있어야 할 것이다.

다짐에 의해 흙 입자 구조가 조밀화 되면, 흙의 성질은 일반적으로는 개선되어, 예를 들면 전단강도는 증가하고, 투수성은 낮아진다. 통상의 흙에서는 강도의 최대치는 최적함수비보다 약간 건조 측에서 나타난다. 한편 투수계수는 건조 단위중량과 역의 관계에 있고, 최적 함수비의 최적 함수비의 약간 습윤 측에서

최소치가 나타난다. 다짐된 후에 지하수면 아래가 되는 부분의 흙에 대해서는, 수침후의 강도가 문제가 된다. 최적함수비보다 건조 측에서는, 수침강도는 오히려 저하하므로, 최대치는 대략 최적 함수비 부근, 즉 최대 건조단위중량 부근에서 나타난다.

그림 2.27은 일본의 칸포롬(關東礬)을 다져서 전단강도를 침입(針入)시험으로 조사한 결과이다. 다진 직후의 불포화토의 최대강도는, 최적함수비보다 약간 낮은 곳에서 생긴다. 그러나 노상, 노반 및 저수용 흙 댐에서는 장시간 경과하면 대략 포화상태에 이르게 된다.

그림 2.27에는 수침(水浸)된 때의 강도도 나타내고 있는데, 최적함수비 부근에서 최대강도가 나타난다. 최대건조단위중량 부근에서는 압축에 도움을 주기 위해 여분의 물이 필요한데 반해서, 수침해서 Suction이 소실되어 겔보기점착력이 없어진 상태에서는 흙 입자의 이맞춤이 좋은 최대건조단위중량 부근에서 침입 저항이 가장 커지는 것이 그림과 같은 거동을 하는 원인이 된다고 생각된다.

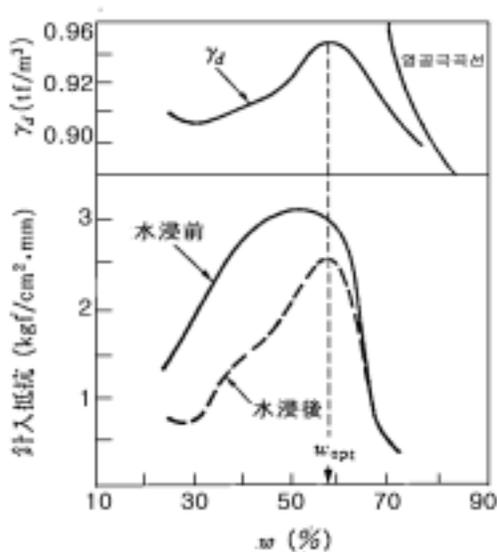


Fig. 2.27 Properties of the Compacted Soil

3) 현장 들밀도 실험

현장의 다짐정도를 알아보기 위하여 현장 건조단위중량을 구해야 한다. 이를 위하여 이용되는 방법으로 모래치환법 또는 샌드콘 방법(Sand cone method)과 고무막법(Rubber balloon method) 등이 있다. 현장 들밀도 실험의 결과는 도로, 철도, 활주로 등의 노상, 노반 및 성토 등의 다짐도를 판정하고, 다짐시공의 시공관리에 이용된다.

(1) 모래치환법

이 시험은 현장에서 최대입경이 50mm이하인 흙의 단위체적 중량을 모래치환법으로 직접 구하기 위한 것이다.

측정방법은 측정지반의 흙을 파내어 구멍을 뚫고, 그 흙의 중량과 시험구멍의 체적을 구하여 흙의 단위중량을 알아내는 방법이다. 이 시험방법은 한국산업규격에서는 KS F 2311에 규정되어 있다. 그림 2.28는 시험체적을 구하기 위하여 굴착한 그림으로 파낸 체적을 채운 표준사의 무게로 구덩이의 체적을 구한다.



Fig. 2.28 Excavation in Sand Cone Method

(2) 고무막법

모래치환법과 같은 원리로 흙의 단위중량을 구하는 방법으로 단지 파낸 부분의 체적을 표준사가 아닌 고무막을 사용하여 물로 채워진 부피를 잰다는 사실만 다르다. 그림 2.29는 고무막법을 이용한 들밀도시험의 모식도이다.

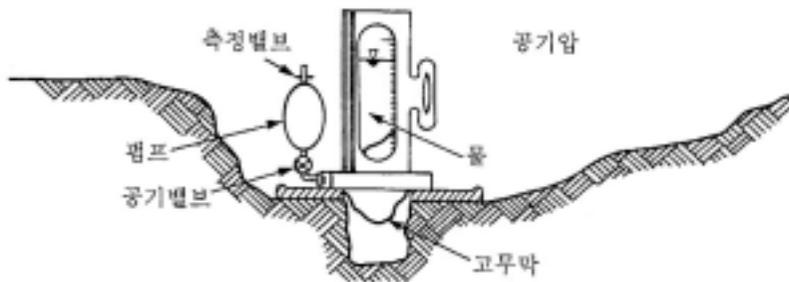


Fig. 2.29 Rubber Balloon Method

4) 평판재하시험

허용침하 조건에 의한 허용지지력 뿐만 아니라 극한 지지력은 현장재하시험으로부터 효과적으로 결정할 수 있는데, 일반적으로 평판재하시험 (KS F 2444-1990)이 이용된다. 현장시험에서 사용하는 평판은 두께 25mm, 직경 300~750mm인 강재원판이 주로 이용된다. 그림 2.30은 평판재하시험의 모식도를 나타낸 것이다.

도로 및 공항포장의 내구성은 노상과 보조기층의 지지력에 좌우되고 이 지지력이 클수록 파손되지 않는 포장을 시공할 수 있다. 따라서 포장을 설계하기 전에 노상의 지지력을 측정하여 지지력에 따라서 교통하중을 고려한 두께를 결정 하는 것은 당연한 과정이 된다.

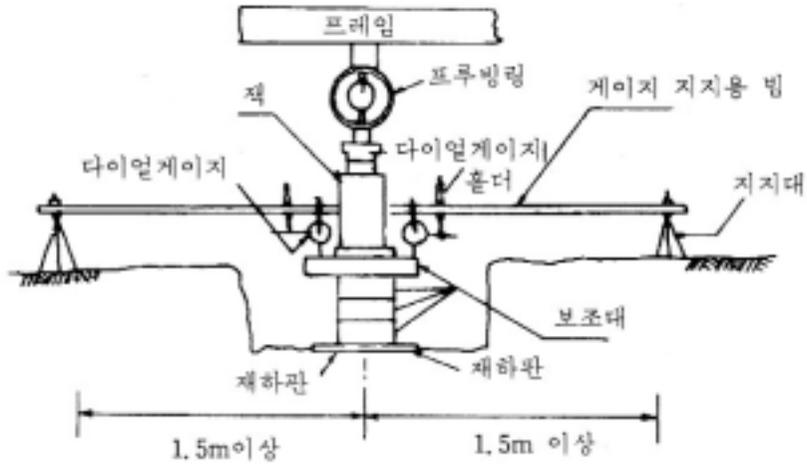


Fig. 2.30 Plate Bearing Test

동일 지점의 지지력도 재하면의 형상과 재하방법에 따라서 달라진다. 포장의 기초가 되는 노상이나 보조기층의 지지력은 당초 자동차의 재하상태와 유사하게 되어있는 평판재하시험으로 측정해 왔다.

아스팔트포장두께 설계방법 중에서 Hubbard법 또는 아스팔트협회(미국)법은 자동차 타이어 접지면과 같은 면적의 재하판을 사용해서 지지력을 측정하고 그 값과 설계 접지압으로 포장두께를 설계하는 방법이며, 일본에서도 이를 적용해오다 1961년 아스팔트포장 요강을 개정하면서 아스팔트포장 두께 설계에는 CBR법을 적용하도록 하고 그 후 평판재하시험은 주로 기층, 보조기층의 다짐관리에만 이용하도록 되었다. 그러나 시멘트 콘크리트포장에는 콘크리트 슬래브두께 설계에 지지력을 표시하는 K치(지지력 계수)를 적용하도록 된 규정이 많이 제정되어 널리 이용되고 있다.

노상토의 지지력계수 측정시험에서 이용되는 재하판의 크기에 따라서 동일지반의 지지력계수가 달라진다. 현재까지의 재하판의 크기가 75cm로 규정하고 있으나 재하판이 크면 취급이 불편할 뿐만 아니라 소요침하량까지 시험하는데 필요한 반력이 커지는 등의 어려움 때문에 특별한 경우를 제외하고는 지름 30cm의 것을 사용하고 이를 수정하는 경우가 많다.

이와 반대로 재하판이 너무 작으면 지반에 묻혀있는 암편의 영향을 받아 측정값의 변화가 심해진다. 따라서 재하판의 크기는 흙의 최대입경에 따라 선택하는 것이 효과적이다. 프랑스에서는 지름 30~60cm의 재하판을 사용하되 흙의 최대입경의 5배 이상으로 규정하고 있고, 독일에서는 최대입경 150mm를 기준으로 이 보다 크면 60cm의 것을 사용하고 이 보다 작으면 30cm의 것을 사용하는 것으로 규정되어 있다.

재하판이 크고 또 지반이 단단하여 하중을 많이 가하여할 경우는 재하판이 하중에 의한 재하판이 변형이 발생하여 정확한 측정값 얻지 못하게 되는데 이를 방지하기 위해서는 작은 것을 겹쳐 놓는 것이 효과적이다. 또 재하판은 충분한 두께(ASTM은 1인치 이상)와 충분한 감성을 가져야 한다. 잭(Jack)의 두부와 재하장치와 사이에는 구좌(Ball Bearing)를 넣어 재하판이 편심하중을 받지 않도록 하는 것이 중요하다.

재하판과 재하장치의 지점과 제이지 지지대의 접지점은 제각기 상대적인 순 간격이 너무 가까우면 표면의 지반변형이 영향을 미치게 된다. 현장에서는 트럭이나 로드롤러(Road Roller)를 사용하므로 이때의 재하판은 30cm의 것을 사용해야 한다. 이들의 상호 상대적인 간격이 KS F나 JIS에서는 1m이상으로 규정하고 있고 ASTM은 2.4m이상, 독일에서는 노상과 동상방지층에서는 60cm, 보조기층과 표층에서는 120cm로 규정하고 있으며 게이지 지지용 보도 ASTM에서는 5.5m로 규정하고 있다.

(1) 평판재하시험에 의한 지반파괴의 형태

재하시험시 발생하는 지반의 파괴 형태는 전반 전단파괴, 극부 전단파괴, 편칭파괴로 구분할 수 있다. 그림 2.31은 평판재하시험의 하중-침하량곡선을 통한 파괴형태를 구분한 것이다.

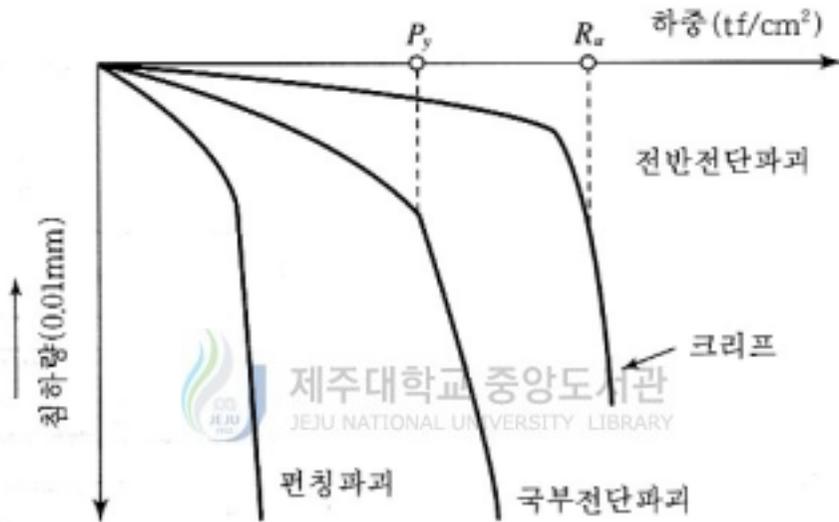


Fig. 2.31 Load-Settlement Curves for Plate Bearing Test

가. 전반 전단파괴

조밀한 모래나 굳은 점성토에 나타나는 형태로 어떤 하중까지는 경사가 작고 직선적이지만 하중이 극한하중(R_u)에 도달하면 침하가 급격히 커지고 주위 지반이 솟아오르며 지표면에 균열이 생기는데, 땅속에 활동 파괴면이 생기는 현상을 전반 전단파괴라고 한다.

나. 국부 전단파괴

느슨한 모래나 연약한 점토지반에서는 활동 파괴면이 명확하지는 않으나 파괴가 점점 확대되어 파괴가 일어난다. 하중-침하곡선에서 경사가 더 급하여 직선으로 올라가는 하중에서 파괴가 되는 것으로 그림 2.31에서 P_y 를 항복하중이라 하며, 이 때의 파괴현상을 국부 전단파괴라 한다.

다. 펀칭파괴

처음부터 침하가 급격하게 일어나다가 크리프 거동을 보이는 파괴를 펀칭파괴(Punching failure)라 한다.

(2) 평판재하시험에 침하량 산정

평판재하시험결과로부터 실제 기초가 지지할 수 있는 극한지지력(q_u) 계산은 근사적으로 다음과 같다.

점성토인 경우

$$q_u(\text{footing}) = q_u(\text{plate}) \quad (2.5)$$

사질토인 경우

$$q_u(\text{footing}) = q_u(\text{plate}) \frac{B(\text{footing})}{B(\text{plate})} \quad (2.6)$$

임의의 하중강도 q 에 대한 기초의 예상 침하량, S 는 평판재하시험에서의 침하량을 이용하여 구할 수 있다.

점성토인 경우

$$S_{(footing)} = S_{(plate)} \frac{B_{(footing)}}{B_{(plate)}} \quad (2.7)$$

사질토인 경우

$$S_{(footing)} = S_{(plate)} \left(\frac{2B_{(footing)}}{B_{(footing)} + B_{(plate)}} \right)^2 \quad (2.8)$$

여기서, $q_{u(footing)}$: 기초의 극한지지력

$q_{u(plate)}$: 시험평판의 극한지지력

$B_{(footing)}$: 기초의 폭

$B_{(plate)}$: 평판의 폭



Ⅲ. 다짐밀도 측정시험

일반적으로 현장에서 다짐밀도를 측정하는 방법으로 다짐시험 및 모래치환법에 의한 들밀도시험 행하여지고 있으며 다짐시공이 완료 후 지반의 지지력을 평가하기 위하여 평판재하시험을 실시하고 있다. 본 연구를 위해 수행한 기존의 다짐밀도를 측정시험방법에 대하여 기술함과 동시에 합성재료에 대한 들밀도 시험방법을 제안하고자 한다.

3.1 실내다짐시험



본 시험을 위하여 도로공사현장 내 A지점 및 B지점에서 채취한 교란 시료에 대하여 실내에서 다짐시험을 실시하였다. 추후 합성재료에 대한 들밀도 시험방법에 의한 결과치를 비교하기 위하여 선정된 2개 시료에 대하여 각각 다짐시험을 실시하여 각 시료의 최적함수비와 최대건조밀도를 구하였다. 다짐시험은 수정 다짐시험방법 중 다짐에너지가 상대적으로 큰 D방법을 이용하였으며 이 때의 최대허용입경은 19.2mm를 기준으로 하였다.

시험에 앞서 현장에서 채취한 자연 상태의 시료를 건조기를 이용하여 건조시켰다. 고온에 의해 흙의 고유한 성질이 변할 가능성을 고려하여 60℃이하를 유지하여 24시간 이상 건조시켰다. 건조된 시료는 실온이 될 때까지 실내에서 식혔으며 식힌 후의 시료는 최대허용입경 조건을 만족하는 시료에 한하여 시험하기 위하여 체질을 실시하였다. 함수비에 신

경을 쓰며 D다짐방법으로 다짐을 실시하였다. 정확한 함수비 측정을 위하여 몰드의 상, 중, 하 부분의 시료를 택하여 함수비를 측정하였다.

KS F 2312에는 다짐시험을 전절에서 기술한바와 같이 다섯 종류로 분류(일본도 우리나라와 동일) 하고 있으나, ASTM에서는 이 표 중 A시험을 표준다짐시험, D시험을 수정다짐시험으로 두 종류로만 나누고 있다(우리나라에서도 주로 이 두 가지 시험이 행해지고 있다). 일반적인 도로의 다짐에는 A시험을 적용하나, 비행장 등 사용 하중이 큰 지반을 다질 때에는 보다 큰 에너지를 가하기 위해서 D시험을 적용하며 D시험의 다짐 에너지는 A시험의 다짐에너지의 약 4.4배에 달한다. 나머지 다른 시험들은 현장의 사용하중에 맞는 다짐에너지, 다짐 대상 흙의 입경 등에 따라 적절히 선택하여 사용하게 된다.

식 3.1은 다짐에너지를 계산하는 식이며 표 3.1은 이 식을 이용해서 구한 각 시험의 다짐에너지를 나타내었다.

$$E_c(kg \cdot cm/cm^3) = \frac{W \cdot h \cdot N_d \cdot N_h}{V_m} \quad (3.1)$$

여기서, E_c : 다짐에너지

W : 래머의 무게(kg)

h : 낙하고

N_d : 다짐층수

N_h : 층당 다짐횟수

V_m : 몰드의 체적(cm^3)

Table 3.1 Compaction Energy According to Laboratory Compaction Tests

다 짐 시 험	A	B	C	D	E
다짐에너지($kgf \cdot cm/cm^3$)	5.96	13.11	11.92	26.23	26.33

3.2 모래 치환법에 의한 현장 들밀도시험

각 지점별 건조단위중량을 결정하기 위하여 A, B지점 각 1개소씩 모래 치환법을 이용한 현장 들밀도시험을 실행하였다. 그러나 모래치환법을 이용하는 경우 시험자의 부주위로 인한 진동이나 충격에 의해 모래가 조밀하게 쌓일 가능성이 있고 이에 따라 밀도가 커지는 경향이 있어 현장에서 시험 시 특히 주의를 기울였다. 또한 시험오차를 줄이기 위하여 입도가 균등한 주문진 규사를 이용하여 시험에 임하였다.

현장 들밀도시험은 현장의 다짐상태를 추정하고자 하는데 있다. 이 시험은 최대입자지름이 5cm이하인 흙의 단위중량을 모래치환법을 통해 습윤 단위중량, 건조단위중량, 함수비를 측정하여 흙의 기본적인 상태와 다짐도를 판정할 수 있다. 그림 3.1는 모래 치환법을 이용한 들밀도시험에서 이용한 측정기를 도시한 것이다. 표 3.2는 모래치환법을 적용하는 경우의 시험공의 최소체적을 나타낸 것이다.

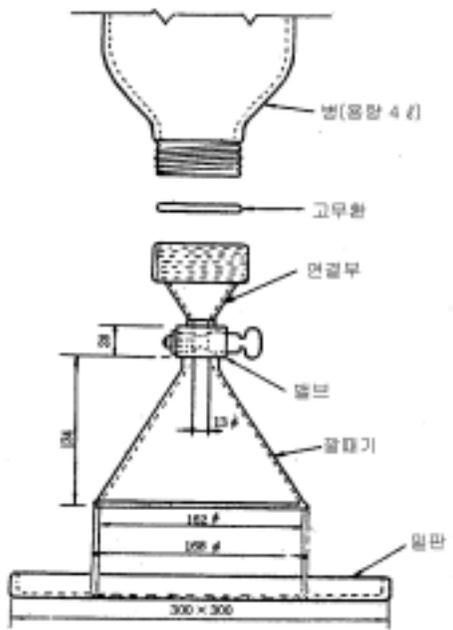


Fig 3.1 Setup of Sand Cone Method

Table 3.2 Minimum Volume of Testing Holes and Weight of Sample

흙의 최대입경(mm)	시험공의 최소 체적(cm ³)	함수량시험의 최소 시료량 (g)
5	700	100
13	1400	250
25	2100	500
50	2800	1000

(1) 용기와 연결부의 체적검정

들밀도 시험을 실시하기에 앞서 실험실에서 측정기의 체적을 사전에 검정하였다. 검정방법을 간략히 살펴보면 측정기를 결합하고 중량을 측정 후 측정기의 밸브구멍까지 물을 채운다. 이때 물은 증류수를 사용

하며 기포가 생기지 않도록 유의한다. 물을 채운 후 밸브를 닫고, 깔때기에 남은 물을 버린 후, 외부를 깨끗이 닦는다. 이때의 물 + 측정기의 중량과 측량기 속의 수온을 측정하여 수온에 따른 물의 체적을 고려하여 용기와 연결부와의 체적을 계산한다. 정확한 측정값을 산정하기 위하여 이와 같은 방법으로 3회 측정을 실시한다. 용기와 연결부의 체적계산은 식 3.2와 같다.

$$V_1 = K(W_2 - W_1) \quad (3.2)$$

여기서, V_1 : 용기와 연결부의 체적

W_2 : 용기와 연결부분에 물이 찼을 때의 중량(g)

W_1 : 측정기 전체의 중량

K : 임의의 온도 일 때의 물 1g 당 체적

(2) 시험용 모래의 단위 체적중량 측정

시험용 표준사를 약 10kg 준비한다. 측정기를 바로 세우고 밸브를 잠근 뒤 시험용 모래를 깔때기의 위까지 넣는다. 밸브를 열고 모래를 깔때기 높이의 반을 유지하면서 모래를 넣는다. 이때 모래 면이 항상 깔때기 높이의 반이 되도록 모래를 보충한다. 모래의 이동이 멈추면 밸브를 닫고 깔때기 속에 남아있는 모래를 버린다. 모래를 채운 측정기의 중량을 측정한다. 측정기 속에 들어있는 모래의 중량을 측정한다. 이를 바탕으로 검정용 모래의 단위중량(γ_s)을 구한다. 모래의 단위중량을 구하는 식은 3.3과 같다.

$$\gamma_s = \frac{W_3 - W_1}{V_1} = \frac{W_4}{V_1} \quad (3.3)$$

여기서, γ_1 : 시험용 모래의 단위중량(g)

W_1 : 측정기 전체의 중량(g)

W_2 : 용기와 연결부분에 모래를 채웠을 때의 중량(g)

W_3 : 측정기 속의 모래의 중량(g)

(3) 깔대기를 채우는 데 필요한 모래의 중량검정

깔대기를 채우는데 충분한 양의 모래를 측정기에 넣는다. 넣은 후 밸브를 닫고 측정기와 모래를 합한 중량을 측정하여 수평을 유지한 두꺼운 유리판 위에 저판을 놓고 깔대기가 아래로 향하도록 해서 측정기를 저판 위에 놓는다. 밸브를 열어 깔대기 속에 모래가 흐르게 한다. 모래의 이동이 중단되면 밸브를 닫아 용기에 남아있는 모래와 측정기의 중량을 측정한다. 저판 구멍의 체적도 깔때기의 일부로 생각하여 깔대기를 채우는데 필요한 시험용 모래의 중량 구한다.

(4) 모래 치환법에 의한 흙의 단위중량시험

시험장소를 선정 후 지표를 평평하게 고르고 현장 들밀도 저판을 지면에 고정시킨다. 단단한 지반인 경우 흙이 유실되지 않게 지반을 정이나 모삽 등을 이용하여 흙을 파 용기에 담는다. 시험구멍은 직경의 1.0~1.5 배 깊이로 파며, 시험구멍의 최소 체적은 흙의 최대입경에 따라 결정하는 것이 바람직하며 이때 용기에 담은 흙의 중량을 측정한다. 표 3.3에 도시한 기준을 참고로 하여 굴착한 흙의 함수비를 측정한다. 표준사를 채운 용기를 밀판 구멍에 맞추어 측정기를 세운 후 밸브를 열고 용기속의 표준

사를 파낸 구멍에 채운다. 표준사의 이동이 없으면 밸브를 잠근 후 측정기에 남은 표준사와 측정기의 무게를 재어 식 3.4를 이용하여 시험구멍의 체적을 구한 후 식 3.5와 3.6을 이용하여 흙의 습윤단위중량 및 건조단위중량을 구한다.

(1) 시험구멍의 체적결정

$$V_0 = \frac{W_9 - W_6}{\gamma_s} = \frac{W_{10}}{\gamma_s} \quad (3.4)$$

여기서, V_0 : 시험구멍의 체적

W_9 : 시험구멍 밑 깔때기 속의 모래의 중량

W_6 : 깔때기를 채우는데 필요한 모래의 중량

W_{10} : 시험구멍을 채우는데 필요한 모래의 중량

γ_s : 시험용 모래의 단위중량

(2) 흙의 습윤단위중량 결정

$$\gamma_t = \frac{W_7}{V_0} \quad (3.5)$$

여기서, V_0 : 시험구멍의 체적

W_7 : 시험구멍으로부터 파낸 흙의 중량

(3) 흙의 건조단위중량 결정

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + w/100} \quad (3.6)$$

여기서, γ_t : 습윤단위중량

γ_d : 건조단위중량

w : 함수비

3.3 평판재하시험

평판재하시험은 지반 상에 원형 또는 정방형의 강철판을 설치하고, 단계적으로 하중을 가하여 얻어지는 하중-침하의 관계로부터 그 지반의 지반반력계수나 극한지지력 등을 구하는 시험이다. 이 시험은 크게 시험대상에 따라 구가지로 나뉘는데 도로나 활주로를 대상으로 하는 것과 구조물 기초지반을 대상으로 하는 것이 있다. 전자(前者)는 “도로의 평판재하시험방법”(KS F 2310)과 “비행장 및 도로포장의 평가와 설계를 위한 가용성 포장의 비반복 평판재하시험방법”(KS F 2339)으로 규정되어 있다.

재하판은 두께 22mm이상의 강재원으로, 지름이 각각 30cm, 40cm 및 75cm 이 있으나 현장에서는 지름이 40cm인 재하판을 사용하여 실험을 실시하였으며 재하판의 크기에 따른 스케일 영향(Scale effect)를 고려하여 재하판이 30cm인 경우로 환산하여 적용하였다.

하중장치는 덤프트럭, 백호우, 강재 등의 재하중이나 지반에 타입한 앵커, 말뚝 등을 사용하는데 본 현장에서의 실험에서는 15ton 덤프트럭에 압과 흡을 가득 실은 상태에서 하중을 가하여 시험을 실시하였다.

1) 시험방법

평판재하시험의 시험방법은 앞에서 기술한 바와 같이 도로의 평판재하시험방법과 기초의 평판재하시험방법이 있으나 본 연구가 도로공사현장을 대상으로 하는 관계로 본 연구에서 적용한 도로의 평판재하시험방법에 대해서만 간략하게 기술하고자 한다.

- 가. 지반을 수평하게 고르고 얇게 모래를 깔 후, 재하판을 설치하였다.
- 나. 재하판 위에 잭을 놓고 지지력 장치와 조합하여 소요반력을 얻을 수 있도록 하였으며 그때 지지력 장치의 지지점은 재하판의 바깥쪽 끝에서 1m이상 떨어져 배치하였다.
- 다. 침하량 측정장치를 재하판 및 지지력 장치의 지지점에서 1m 이상 떨어져 배치하였고 침하량 측정을 위한 변위계를 부착하였다.
- 라. 재하판이 안정적으로 지표면에 고정되도록 미리 하중을 가한 후, 하중을 제거하여 변위계의 눈금을 체크하였다.
- 마. 하중을 단계적으로 증가시키는 과정에서 하중에 의해 침하의 진행이 멈추는 것을 기다리며 하중계와 변위계를 체크하였다.
- 바. 침하량이 15mm이거나 하중강도가 현장에서 예상할 수 있는 가장 큰 접지압력의 크기 또는 지반의 항복점을 넘으면 시험을 종료하였다.

그림 3.2와 3.3은 본 연구를 위한 도로공사현장에서 실시한 평판재하시험을 나타낸 것이다. 평판재하시험을 수행함으로써 지반의 극한지지력을 결정할 수 있으며 도로의 노상 및 노반의 경우 지반계수(K)를 결정할 수 있다. 도로현장의 경우 소정의 침하량에 대하여 일반적으로 아스팔트 포장은 0.25cm, 콘크리트 포장에선 0.125cm에 대한 하중강도를 구할 수 있다.



Fig. 3.2 Plate Bearing Test(Loading)



Fig. 3.3 Plate Bearing Test(Measuring Load and Settlement)

3.4 합성재료에 대한 들밀도 시험방법의 제안

기존의 모래치환법을 이용한 들밀도시험방법은 지반 하에 암버력이 상당부분 존재하는 경우 적용하기에는 다소 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 합성재료에 대한 들밀도 시험방법을 제안하고 제안한 시험방법을 현장에 적용하여 모래치환법에 의한 들밀도시험결과와 비교하고자 한다. 본 연구에서 적용한 합성재료에 대한 들밀도시험방법을 간략하게 설명하고자 한다.

먼저 시험시공을 위해 선정된 지점의 기초면을 평탄히 고르고 다짐장비를 이용하여 다짐을 실시한 후, 석회가루 등을 이용하여 선정된 시험시공 기초지반에 굴착할 기준면을 표시한다. 시험 굴착부의 크기를 가로 2m, 세로 2m가 되도록 표시한다. 표시된 기초면을 벗어나지 않게 건설장비를 이용하여 암버력을 굴착을 한다. 표시된 암버력의 시험 굴착부를 건설 장비를 이용하여 굴착고가 40cm가 될 때까지 굴착하며 동시에 암버력의 입도시험 및 중량을 측정한다. 굴착과정에서 정확한 굴착을 위해 삽을 이용하여 굴착면을 다듬는다. 물을 이용한 굴착부의 체적을 측정하기 위하여 암버력 굴착부분에 흙 입자사이로 물이 흡수 및 투수되는 경우를 방지하기 위하여 얇은 비닐시트를 2겹으로 깔고 시험 굴착부의 기준면을 설정한 후, 암버력이 차지하고 있던 부분의 체적을 측정하기 위하여 물을 채워 넣는다. 물을 채우는 과정에서 사용된 물의 총량을 측정한다. 마지막으로 식 3.7을 이용하여 암성토 구간의 단위중량을 산정한다.

$$\gamma_R = \frac{\Sigma W_R}{\Sigma V_W} \quad (3.7)$$

여기서, γ_R : 암성토 구간의 단위중량

ΣW_R : 암벼력의 총 중량

ΣV_W : 암벼력 구간을 물로 채운 물의 총 부피

그림 3.4는 도로공사현장에서 실시한 합성재료에 대한 들밀도 시험방법을 간략하게 도시화 한 것이다.



<p>가로×세로 = 2×2m</p>	
<p>터파기 깊이 측정 및 평균 높이 측정</p>	
<p>백호를 이용한 터파기</p>	
<p>터파기를 통한 흙과 암석의 무게측정(W)</p>	
<p>물을 이용한 부피의 측정(V)</p>	
<p>측정값의 정리 및 계산</p>	

Fig. 3.4 Measuring Compaction Density of Synthesized Materials

IV. 시험결과

본 연구를 위하여 현재 시공 중인 도로공사현장 중 2개 지점을 선정하여 실내 및 현장시험을 실시하였다. 본 절에서는 실내 및 현장시험결과를 바탕으로 결과에 대한 분석을 하고자 한다. 현장시험에 앞서 시험 대상토에 대한 기본적인 물리적 특성을 알기 위하여 입도분포를 판단하기 위한 체가름시험과 비중시험을 실시하였다. 또한 2개 지점에 대하여 다짐밀도를 측정하기 위하여 실내 다짐시험 및 모래치환법에 의한 들밀도시험과 합성재료에 대한 들밀도 시험을 실시하였고 현장다짐시공 후 지지력 및 침하에 대한 안정성을 검토하기 위하여 평판재하시험을 실시하였다.



4.1 체가름 시험결과

시험대상 지반의 물리적 성질을 판단하는 기초 자료로 활용하기 위하여 합성재료에 대하여 체가름시험을 실시하였다. A, B지점 2개소의 대상지반 모두 20cm이상의 암편이 다량 포함되어 있었으며, 육안으로도 조립에 가까운 형상을 띄고 있었다. 그림 4.1은 도로공사현장의 A와 B지점에 대한 입도분포곡선을 나타내었다. 200번체 통과율이 각각 2.8%, 1.1%이며 균등계수는 각각 4보다 크므로 통일분류법 상 A,B 모두 GW상에 속하며 입도분포가 좋은 모래 섞인 자갈로 분류되었다. 표 4.1은 도로포장 공사시 다짐기준을 표로 나타내었다.

본 시험의 대상토가 노상 상부 토층을 대상으로 하여 다짐시험이 이루

어졌다는 점을 감안하여 표 4.1을 살펴보면 노상 상부 토층의 입자로는 부적합한 100mm이상의 입자가 8.4%~10.3% 포함되어 비교적 노상 상부 기준으로 다짐이 양호하게 이루어졌음을 알 수 있다. 그러나 입경이 200~300mm 범위에 포함되는 비교적 큰 암벼력이 상당부분 포함되어 있어 현장에서 유용되는 합성재료를 흙 쌓기에 이용함에 있어 부적절한 재료임을 알 수가 있다.

호박돌	큰 자갈	조립	중간	세립	조립	중간	세립	점토 및 실트
		자갈			모래			



Fig 4.1 Results of Sieve Analysis

Table 4.1 Compaction Criterion

구분	공종	노체	노상		비고
			하부	상부	
	다짐두께(cm)	30이하	20이하	20이하	
	최대입경(mm)	300이하	150이하	100이하	
	다짐도(%)	90이상	90이상	95이상	KSF2311, KSF2312
	CBR	2.5이상	5이상	10이상	KSF 2320
	계획고 오차(cm)	±5	-	±3	
	#4번체 통과분(%)	-	-	25-100	
	#200번체 통과분(%)	-	-	0-25	KSF2309
	#4번체 통과분(%) #200번체 통과분(%)	-	50이하	-	KSF2304
	소성지수(PI)	-	30이하	10이하	KSF2303, KSF2304
	프르빙링 시변형(mm)	-	-	5이하	
	3m 직선자에 대한 요철(mm)	-	-	25이하	
평판재하시험	C.P	K30 15이상	K30 15이상	K30 15이상	KSF 2310 재하판 규격 30cm 침하량기준 C.P : 0.125cm A.P : 0.25cm
	A.P	K30 20이상	K30 20이상	K30 20이상	
	다짐방법	AB	C.D.E 방법		
	사용금지조건	<ol style="list-style-type: none"> 1. 유기성 점토, 이탄 함유한 점토 2. 액성한계 50% 이상되는 재료 3. 소성한계 25% 초과되는 재료 4. 건조밀도 1.5t/km³ 이하인 재료 5. 간극율 42% 이상인 재료 6. 유해물(나무토막, 뿌리)를 함유한 재료 			

4.2 실내 다짐시험결과

도로공사현장 내 동일대상 2개 지점 A, B에 대하여 실내다짐시험을 실시하였다. 실내 다짐시험방법은 일반적으로 도로현장에서는 A다짐방법이 이용되어 왔으나 현재 다짐장비의 개선과 발전으로 인하여 다짐에너지가 증대된 관계로 기존의 A다짐을 적용하기에는 불합리한 점이 없지 않다. 따라서 본 연구에서 적용한 다짐방법은 A다짐방법보다 4.4배정도 다짐에너지가 큰 D다짐방법을 이용하였다. 그림 4.2와 4.3은 A, B지점에서 채취한 시료에 대하여 다짐시험을 실시한 후, 그 결과에 따른 다짐곡선을 도시한 것이다. 다짐시험결과 A, B지점 모두 거의 동일한 최적함수비와 최대 건조단위중량을 보이고 있다. 노상의 다짐은 KS F 2312규정에 의거 최대건조단위중량의 95%이상의 건조단위중량이 되도록 균등하게 다져야 된다고 명시되어있다.

다짐시험 결과 A와 B지점 각각 최대건조단위중량이 1.854, 1.865kg/cm³의 값을 보였으며 최적함수비는 15.5~16.0%사이를 보이고 있다. 따라서 A, B지점 각각 건조단위중량이 1.76, 1.77kg/cm³이상 되도록 현장다짐이 이루어져야 한다. 표 4.2는 다짐시험결과를 표로 나타낸 것이다.

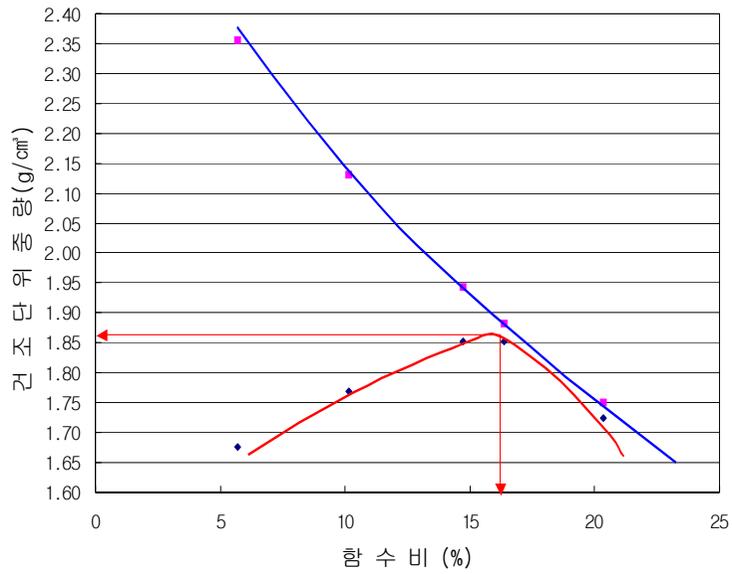


Fig. 4.2 Compaction Curve for the Site A

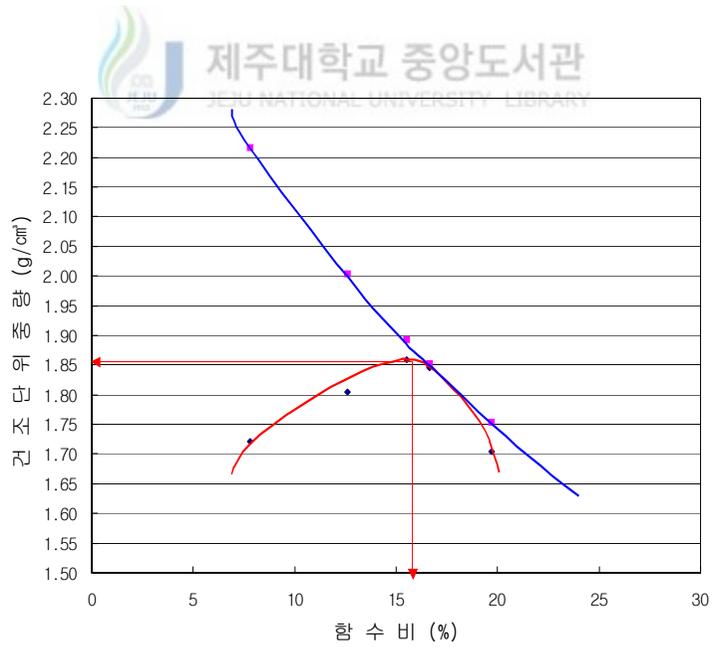


Fig. 4.3 Compaction Curve for the Site B

Table 4.2 Result of Laboratory Compaction Test

지점	최대 건조단위중량 (kg/cm ³)	최적함수비 (%)	최대 건조단위중량의 95% (kg/cm ³)
A지점	1.854	15.5	1.76
B지점	1.865	16.0	1.77

4.3 모래치환법에 의한 들밀도 시험결과

모래치환법에 의한 들밀도 시험은 무엇보다 작은 체적을 기준으로 밀도를 추정하는 시험인 관계로 현장토의 함수비 측정과 측정기의 체적을 검정하는 과정에서 발생하는 모래의 단위중량의 변화에 민감한 시험이다. 따라서 본 실험을 위하여 함수비의 측정과 모래의 단위중량 검정 그리고 측정기의 체적을 검정하는 과정에 보다 신중을 기하였다. 시험결과 A, B 지점의 건조단위중량이 각각 1.93, 1.99kg/cm³으로 다짐시험결과를 참고하여 다짐도를 추정한 결과 각각 104%, 106%로 노상 상부기준 95%이상을 다짐기준으로 볼 때 다짐이 양호하게 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 일반적으로 현장에서의 다짐시공 시 다짐도가 100%이상의 값을 보이는 힘들다. 그러나 다짐기술 및 다짐장비의 발달로 보다 큰 다짐에너지로 얻을 수 있게 되었으며 다짐시공 후 도로포장을 위한 작업장비의 빈번한 출입으로 다짐효과가 양호하게 나타난 것으로 분석된다. 또한 입도분석 결과 4번체(4.75mm)이상이 40~60% 포함되어 있고 노상 상부 토층의 기준이 되는 100mm이상의 입경을 갖는 암벼력이 8~10% 포함되어 있어 일반토사로만 이루어진 토층보다 다짐효과가 양호하게 나타난 것으로 분

석된다. 표 4.3은 모래치환법에 의한 들밀도시험결과를 나타낸 것이다.

Table 4.3 Results of Sand Cone Method

지점	건조단위중량(kg/cm ³)
A지점	1.93
B지점	1.99

4.4 평판재하시험

평판재하시험은 지반 위에 직접 재하판을 놓고 재하강도와 침하량과의 관계를 측정해서 하중-침하량 곡선을 그린 후, 어떠한 침하량일 때의 하중강도를 구하여 지지력 계수를 산정하는 시험으로 본 연구를 위하여 A와 B지점 각 1개소에 대하여 시험을 실시하였다. 지지력계수, K는 다음의 식으로 구한다.

$$K(\text{kg/cm}^2) = p/y \quad (4.1)$$

여기서, p : 하중강도(kg/cm²)

y : 침하량(cm)

노상 지지력계수 K를 구하기 위해 현장여건에 따라 직경 30~75cm의 재하판이 이용되며 재하방법은 예상되는 극한 하중의 1/4~1/5정도씩 증

가시키면서 침하량을 측정한다. 일반적으로 도로의 평판재하시험에서는 직경 30cm 이상의 원형으로 상하면이 평활하고 두께 25mm이상의 동판을 사용하는 것이 바람직하다. 지지력계수는 하중강도-침하량곡선에서 일정한 침하량일 때의 하중강도를 구하고 결정방법은 식 4.2와 4.3과 같다.

$$K_{75} = \frac{1}{2.2} K_{30} \quad (4.2)$$

$$K_{75} = \frac{1}{1.5} K_{40} \quad (4.3)$$

ASTM(American Society for Testing and Materials)의 D-1194에 의한 현장재하 표준방법에 따르면 재하판 직경이 152.4~762mm와 30×30cm 정사각형 재하판을 사용하나, 본 연구에서는 직경 40cm의 원형 재하판을 이용하여 시험을 실시하였다.

시험결과를 바탕으로 식 4.1에 의하여 K_{40} 을 계산한 결과 각각 15.8kg/cm²와 16.8kg/cm²로 나타났다. 시방서 기준에는 K_{30} 인 경우 0.2N/mm²이상의 지지력 계수를 확보하도록 규정 되어있어 식 4.1에 의하여 산출한 40cm의 재하판을 이용한 경우의 지지력계수, K_{40} 을 식 4.2와 4.3을 이용하여 K_{30} 으로 환산하여 지지력계수를 계산하면 각각 23.16kg/cm², 24.64kg/cm²의 결과를 얻을 수 있다. 시방서 기준의 K_{30} 이를 SI단위로 환산하면 19.6kg/cm²이며, 이를 지지력 계수만을 고려하여 비교한다면 A, B지점 모두 23.16kg/cm²와 24.64kg/cm²로 양호한 지지력 계수를 보이고 있다. 또한 K_{75} 로 환산 계산하면 각각 10.53, 11.2kg/cm²의 결과가 나온다. 각각의 K_{75} 값

을 그림 4.4에 도시된 그래프 상에 위치시키면 CBR 값의 30~40%에 위치함을 알 수 있다. 표 4.1에 도시된 다짐기준 중 CBR 항목기준을 참고하면 노상상부인 경우 CBR값이 10%이상을 기준으로 하고 있음을 알 수 있다. 따라서 A, B지점 대상지반은 노상토로서 양호한 흙으로 판단된다. 그림 4.5와 4.6은 각각 A, B지점에 대한 하중강도와 침하량과의 관계를 그래프로 도시한 것이다. 일반적인 하중강도와 침하량과의 관계가 위로 볼록한 거동을 보이는 경향을 갖는데 본 실험결과 그래프의 추세선이 불규칙함을 알 수 있다. 이는 지반 하에 존재하는 합성재료가 균일성이 떨어져 발생하는 것으로 불규칙한 입도분포를 보이는 재료에 대한 평판재하시험의 경우 신뢰성이 없다고 판단된다.

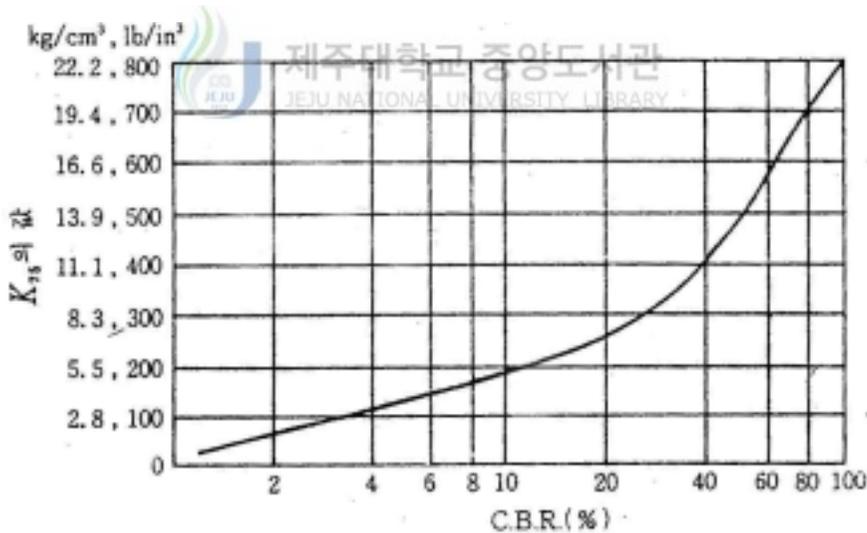


Fig. 4.4 Relationship between K_{75} and CBR

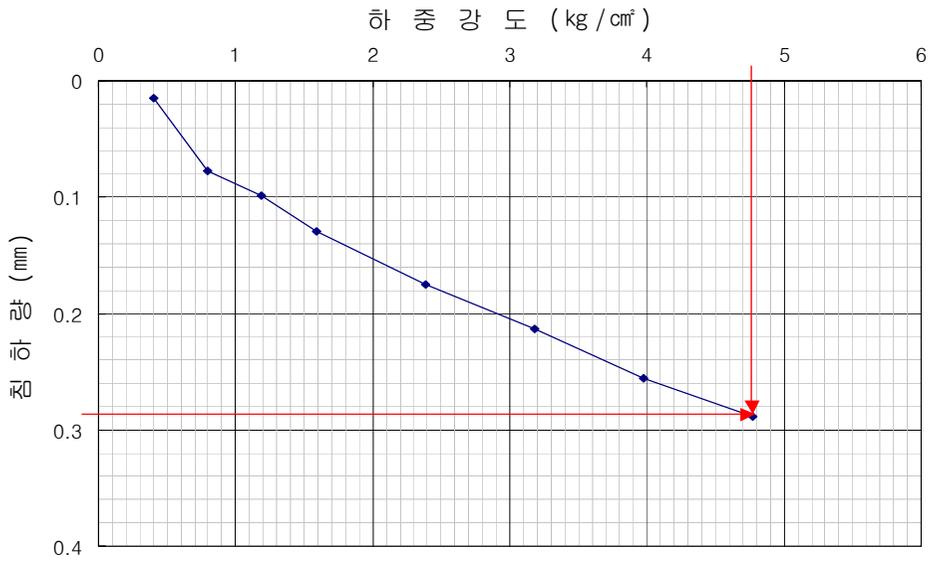


Fig. 4.5 Result of Plate bearing Test at the Site A

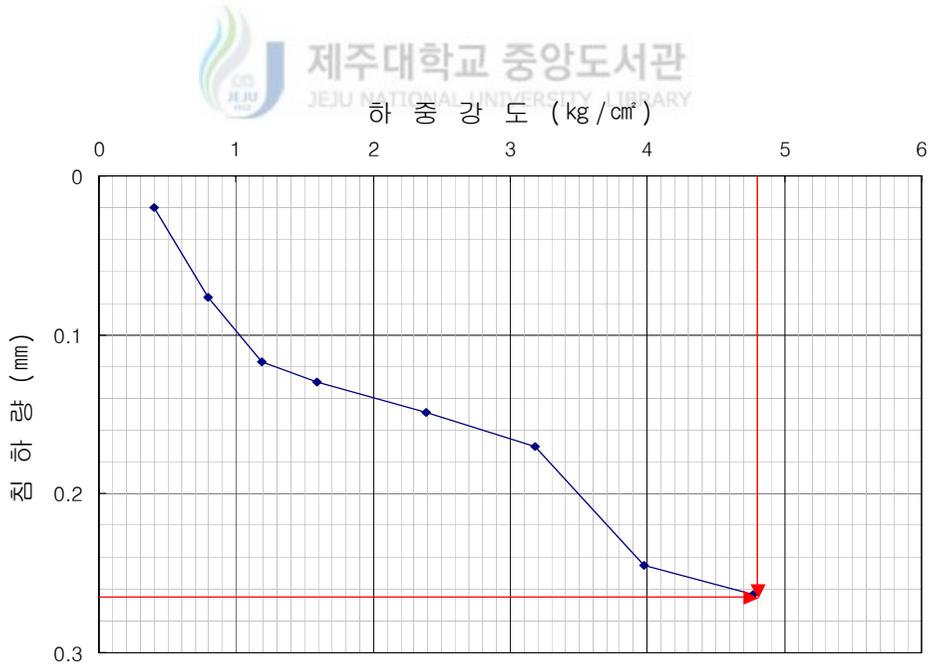


Fig. 4.6 Result of Plate bearing Test at the Site B

표 4.4는 재하판의 크기에 따른 지지력 계수 환산표를 나타내 것이며 표 4.5는 계략적인 노상토의 K_{75} 의 값의 관계를 나타낸 것이다.

Table 4.4 Conversion Table of Bearing Capacity Factor

재하판 직경(cm)	환산계수
75	1
50	1/1.3
40	1/1.5
30	1/2.2

Table 4.5 Values of K_{75} According to Road Soil

노상토	K_{75} (kg/cm ²)
대단히 불량한 흙	1.4
양호한 흙	8.3
아주 양호한 흙	19.4

4.5 합성재료에 대한 들밀도시험결과

현장에서 도로공사를 시공 중에 발생하는 문제는 지반내 암버력이 상당 부분 존재하고 있어 일반적인 모래치환법에 의한 들밀도 시험방법을 적용하는 경우 암버력 크기가 시험 규정치를 초과하는 경우가 빈번히 발생하

고 있다. 설사 제대로 모래치환법에 의한 들밀도시험을 실시한다 하여도 측정된 지반의 밀도에 대하여 의구심을 버릴 수 없는 것이 현실이다. 따라서 모래치환법을 이용한 들밀도시험결과와 합성재료에 대한 들밀도 시험결과를 비교분석하고자 하였다. 이를 위하여 밀도를 측정하기 위하여 대략 가로2m, 세로2m 깊이 40cm로 지반을 굴착한 후 굴착으로 인하여 발생하는 암석과 토사의 무게를 각각 측정하여 밀도를 구하는 방법을 적용하였다. 굴착부의 체적을 구하기 위하여 모래치환법에서는 표준사를 이용하였으나 본 실험에서는 굴착부를 채우는 물의 양으로 체적을 산정하였다. 물을 주입하는 과정에서 지반으로 물이 침투하는 것을 방지하고 보다 정확한 체적측정을 위하여 굴착부를 비닐로 덧씌우는 방법을 이용하였다. 시험결과 모래치환법을 이용하여 추정된 습윤 단위중량보다 다소 큰 경향을 보였다. 이는 지반 하에 암버력이 상당부분 포함하고 있어 모래치환법에 의한 들밀도시험결과보다 크게 산정된 결과라고 판단된다. 또한 작업차량(덤프트럭 등)의 이동으로 인하여 계속적인 다짐이 진행되었고 노상 상부의 흙쌓기 다짐 시 진동롤러(10t)를 사용하였기에 다짐효과가 양호하게 나타난 결과라고 볼 수 있다. 표 4.6은 합성재료에 대한 들밀도시험결과를 나타낸 것이다.

Table 4.6 Results of Measuring Compaction Density of Synthesized Materials

지점	습윤단위중량(kg/cm ³)
A지점	2.24
B지점	2.19

V. 결 론

현재 건설공사 현장에서는 부실공사의 방지 및 품질향상을 위하여 종래의 재래공법을 배제하고 신공법에 대한 투자와 현장에서 신공법의 적용을 최우선 과제로 삼고 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 노상 흙쌓기 다짐 밀도 측정시험법을 이용하여 도로공사현장 내 A와 B지점의 노상상부토층에 대하여 실험하였고 동일지점에 대하여 3장에서 제안한 합성재료에 대한 다짐밀도시험을 실시하여 그 결과를 비교분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1. 일반적인 도로공사현장에서 흙쌓기 시공 시, 흙쌓기 합성재료에 대하여 체가름 과정을 거치지 않고 기존의 유도곡선을 적용하여 경제성 여부를 검토, 입도분포를 배제한 시공이 이루어졌으나 본 연구의 대상지점에 대한 입도분석결과 100mm이상의 석재가 8~10%가 포함되어 있어 건설교통부에서 제시한 노상상부토층에 대한 다짐기준인 100mm이하 기준에 벗어나 노상상부토층으로는 부적합하였다.
2. 기존의 모래치환법에 의한 다짐밀도시험법을 적용하여 노상상부토층에 대하여 시험한 결과 A, B 지점의 건조단위중량이 각각 1.93과 1.99kg/cm³의 값을 보여 다짐도만으로 판단한다면 다짐효과가 양호하다고 판단되나, 다짐시험결과 최대 건조단위중량이 A, B지점 각각 1.854와 1.865kg/cm³값을 보였다. 시험시료의 최대허용입경이 19.2mm로 제한하고 있는 다짐시험규정을 고려하고 입도분석결과 암버럭이

상당부분 포함된 지층이라는 점을 감안한다면 노상상부토층에 대한 모래치환법에 의한 다짐밀도시험법을 적용하는 것은 부적절하다고 판단된다.

3. A, B지점에 대한 평판재하시험결과, 시방규정에 의거 하중 지지력계수를 $19.6\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상으로 규정되어 있음을 감안한다면 A, B지점 모두 23.16 과 $24.64\text{kg}/\text{cm}^2$ 보여 규정치를 만족하고 있다. 그러나 일반적인 하중강도에 대한 침하량곡선이 위로 볼록한 곡선의 거동을 보인다는 점을 고려하여, 본 시험의 결과를 검토하면 하중에 대한 침하량 곡선이 불안정함을 알 수 있다. 이는 지반 하에 100mm 이상 입경이 10% 정도 포함하고 있으며 260mm 정도의 입경을 갖는 암버력도 일부가 포함된 지반 위에서 시험이 시행된 결과라고 판단된다. 따라서 암버력이 많은 지역 특성상 합성재료에 대한 평판재하시험의 신뢰성이 떨어진다고 판단된다.
4. 본 논문에서 제안한 합성재료에 대한 들밀도시험법을 A, B지점에 적용하여 시험한 결과 건조단위중량이 $1.91\text{kg}/\text{cm}^3$ 과 $1.87\text{kg}/\text{cm}^3$ 의 값을 보여 다짐도가 양호하다고 판단된다. 암버력이 허용치 이상 포함하고 있으나 시험 체적을 크게 함으로써 오차범위를 줄여 다짐도의 정밀성을 요구하였다. 모래치환법에 의한 들밀도시험, 평판재하시험 결과 모두 양호한 다짐도를 보이고 있으나 이는 노상 다짐 후 대형장비의 이동 및 다짐장비의 개선의 결과라고 판단된다. 그러나 모래치환법의 경우 다짐도가 약간 과다하게 나타나는 경향이 있으며 평판재하

의 경우 시험대상 공구의 입도가 불균일하여 결과분석에 문제점이 야기되었다. 제안된 합성재료에 대한 다짐밀도시험법에 의한 시험결과에 의하면 허용치 입경 이상의 암버럭이 일부 존재하고 있으나, 일반토사의 다짐도는 양호한 것으로 판명되었다.



VI. 참 고 문 헌

- 건설부, 1996, 도로공사 표준시방서, pp77-81.
- 건설부, 1995, 토목공사 감리 실무용령, pp.477-478
- 김용필, 정경환, 송여선, 1997, 지반공학시험법 및 응용, 세진사, pp234
- 신방웅, 박홍규, 2002, 토질시험법, 구미서관, pp239-242
- 이송, 김태훈, 이재현, 2002, 토질시험법, 구미서관, pp.355-362, pp444-461.
- 이인모, 2000, 토질역학의 원리, 새론, pp2, pp18-19, pp59-69.
- 정진섭, 이문수 공역, 2001, 한계상태의 토질역학, 새론, pp.2-3
- 천병식, 2002, 건설기술자를 위한 지반주입공법, 원기술, pp.437-453.
- 첨병식, 유한규, 1997, 토질시험 및 지반조사, 건설연구사, pp.95-102
- Braja M. Das, 1997, Principles of Geotechnical Engineering, PWS Publishing Company, pp.105-150.
- Hunt, Roy E. 1986, Geotechnical engineering Techniques and Practices, McGraw-Hill Company, pp12-15
- Lambe, T. W, 1958, The Engineering Behavior of Compacted Clay, Journal of the Soil Mechanics and Foundations, Prentice-Hall, Inc, pp. 275-292.
- Lambe, T. W. and R. V. Whitman, 1979, Soil Mechanics SI Version, pp890-898.
- Procter, R. R, 1933, Design and Construction of Rolled Earth Dam, Engg. News Record, Vol.3, pp.245-289, pp.348-351.
- Seed, H. B. and Chan, C.k, 1959, Structure and Characteristics of Compacted Clay, Journal of the Soil Mechanics and Foundation

Engineering Division, ASCE, Vol, NO. SM5, pp.87-128.

Terzaqhi Karl , Peck, Ralph. B, Gholamreza, 1996, Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc., pp.310-322.



감 사 의 글

산 속으로 들어가 수도하는 것은 사람을 피하기 위해서가 아니라 사람을 발견하는 방법을 배우기 위해서 수많은 세월을 외롭게 자신과 싸우고 있듯이, 가슴에 지녔던 꿈들을 펼치기 위해 날개 짓을 저으며 계획했던 꿈을 이루기 위해서 몸부림을 치기 시작합니다.

계획했던 꿈을 시작도 못했다고 하면서 난감해하며 속상해하는 사람이 있을지 모르지만 “지금부터라고.....” 하며 마음을 다지고 학문의 길을 들어 선지가 엇그제 같았는데 벌써 학위 논문을 연구할 수 있다는 시간들이 자신을 의심해 봅니다.

이제 학위 논문을 연구한다는 것은 책을 멀리 떠나보내는 것이 아니라 지금부터가 시작이라고 되 뇌이면서 지난 5학기동안 지친 몸으로 밤늦은 시간까지 공학도의 이론을 열강 하여 주신 여러 교수님들의 학문을 산업 발전에 이바지할 수 있는 발판으로 끊임없이 연구 노력해 보고자 다시 한번 다짐합니다.

본 연구 논문을 작성하기까지 피곤한 몸을 마다하지 않고 바쁜 시간에도 불구하고 논문을 지도하여 주신 남정만 교수님의 배려 속에 최선을 다할 수 있었으며, 또한 해박한 학문의 지식 앞에서 길을 찾아 나설 수 있도록 용기를 주신 교수님께 이 지면을 통하여 다시 한번 진심으로 감사를 드립니다.

또한, 4학기 동안 늦은 밤까지 해박한 학문을 일깨워 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 이병걸 교수님, 박상렬 교수님, 김상진 교수님, 김성근 교수님, 고희성 교수님께 깊은 감사를 드리고 끝으로 본 논문 작성에 몰심양면으로 피곤한 몸으로 바쁜 시간을 할애하며 적극적으로 도와준 공학 석사 조영웅 및 현장 들밀도 시험에 참여하여 도와주신 성환이, 정한이,

그리고 멀리에서 가족과 헤어져 외로움을 극복하며 유학 생활을 하는 광일이 및 학부생 여러분들에게 깊은 감사를 드립니다.

주경야독을 같이하며 소주잔을 기울이고 서로의 논문을 걱정하고 논의하며 늦은 밤까지 지새우던 2002학번 동기생들에게 오늘의 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

그리고 늦은 나이에 책과 가까이 하는 남편을 뒤에서 말없이 지켜보며 뒷바라지 해준 영원한 나의 아내 강정수씨, 그리고 아무 탈 없이 착하게 열심히 자라고 있는 딸 아네스, 희은, 민주에게도 이 지면을 빌어 가장으로서의 귀감이 되었으면 하는 아빠 생각이며, 항상 근면하고 성실하게 사회에 적응해주길 바란다.

무더위가 기승을 부리는 7월의 어느 날

